



Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

22 Juny 2016

**UPC
ETSEIAT**

ESTUDI SOBRE TRANSPORT PNEUMÀTIC DE PARTÍCULES IRREGULARS

MEMÒRIA

Autor: Alejandro Pursals Zaragoza

Director: Esteban Codina Macia

Co-Director: Pedro Javier Gamez Montero

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Convocatòria: Juny del 2016

Índex de Contingut

1. INTRODUCCIÓ	7
1.1 OBJECTE	7
1.2 ABAST	7
1.3 REQUISITS	7
1.4 JUSTIFICACIÓ DEL TREBALL	8
2. DESENVOLUPAMENT	9
2.1 ANTECEDENTS I REVISIÓ DE L'ESTAT DE L'ART	9
2.2 METODOLOGÍA DE CàLCUL.....	12
2.2.1 Anàlisi del producte	12
2.2.2 Anàlisi Cinètic.	19
2.2.3 Pèrdues de càrrega	26
2.3 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE CàLCUL	37
2.4 PROPULSORS DE GAS.....	49
2.4.1 Ventiladors radials (centrífugs).....	50
2.4.2 Ventiladors axials.....	52
2.4.3 Bufador del tipus “Roots”	54
2.5 SEPARADORS AIRE/PRODUCTE	59
2.5.1 Separadors aire/producte primaris.....	59
2.5.2 Separadors aire/producte secundaris	63
2.6 DOSIFICADORS DE PRODUCTE EN POLS.....	69
2.6.1 Vàlvula Rotativa	69
2.6.2 Extractor de fons pla	70
2.6.2 Extractor Vibrant.....	71

2.7 INSTRUMENTACIÓ	72
2.7.1 Sensors de Pressió	72
2.7.2 Sensors de Temperatura	73
2.7.3 Sensors de Cabal	74
2.7.4 Sensors de Nivell	76
3. RESUM DE RESULTATS	79
3.1 RESUM DEL PRESSUPOST	79
3.2 ANÀLISI I VALORACIÓ DE L'IMPACTE AMBIENTAL.....	80
3.3 PLANIFICACIÓ I PROGRAMACIÓ DEL TREBALL FUTUR PROPOSAT .	81
3.4 CONCLUSIONS I RECOMANACIÓ DE CONTINUACIÓ DEL TREBALL.	81
3.5 CONCLUSIONS.....	82
4. SIMBOLOGIA DEL TREBALL	83
5. BIBLIOGRAFIA	87

Índex d'Equacions

Equació 1.....	13
Equació 2.....	13
Equació 3.....	13
Equació 4.....	13
Equació 5.....	21
Equació 6.....	22
Equació 7.....	24
Equació 8.....	24
Equació 9.....	24
Equació 10	24
Equació 11	25
Equació 12	27
Equació 13	28
Equació 14	28

Equació 15	28
Equació 16	28
Equació 17	28
Equació 18	28
Equació 19	28
Equació 21	29
Equació 22	29
Equació 23	30
Equació 24	30
Equació 25	30
Equació 26	31
Equació 27	31
Equació 28	31
Equació 29	33
Equació 30	34
Equació 31	35
Equació 32	35
Equació 33	35
Equació 34	35
Equació 35	35
Equació 36	35
Equació 37	35
Equació 38	36
Equació 39	36
Equació 40	36
Equació 41	36

Índex de Taules

Taula 1: Classificació de les dimensions de partícula en funció de diferents paràmetres estandarditzats.....	14
Taula 2: Material i classificació segons Geldart i Jenike.	18
Taula 5: Classificació dels ventiladors en funció de les pèrdues de càrrega.....	49
Taula 4: Pressupost d'Equips i Material.	79
Taula 5: Pressupost de personal.	80
Taula 6: Pressupost total.	80

Índex de Gràfics

Gràfic 1: Patrons de flux.	19
Gràfic 2: Velocitat de la mescla en canonada vertical en funció del gradient de pressió aplicat.....	21
Gràfic 3: Velocitat de la mescla en canonada horitzontal en funció del gradient de pressió aplicat.....	23
Gràfic 4: Coeficient experimental degut a la fricció en vers la velocitat de la mescla. ..	41
Gràfic 5: Corbes característiques dels ventiladors centrífugs	51
Gràfic 6: Comparació Ventilador centrífug i Bufadors del tipus "Roots".	55
Gràfic 7: Corbes característiques dels ventiladors centrífugs S&P CKAT/2-901.	56
Gràfic 8: Corba característica del ventilador S&P CBM (petit).	56
Gràfic 9: Corba característica del ventilador centrífug Sodeca model CBD.	57
Gràfic 10: Corba característica del ventilador centrífug Sodeca model CMC.	57

Índex de Figures

Figura 1: Transport pneumàtic en fase diluïda per impulsió.	10
Figura 2: Transport pneumàtic en fase diluïda per aspiració.	10
Figura 3: Transport pneumàtic en fase densa.	11
Figura 4: Perillositat del material pulverulent en funció de la mida de gra.	15
Figura 5: Seqüència d'obturbació d'una canonada horitzontal.....	25
Figura 6: T cega.....	33
Figura 7: Classificació dels diferents rodets existents per a ventiladors.....	50
Figura 8: Vista explotada d'un ventilador radial centrífug d'àleps inclinats enrere.	50
Figura 9: Ventiladors centrífugs	51
Figura 10: Ventilador axial.....	52
Figura 11: Efecte de les directrius o comportes sobre les línies de corrent a entrada i sortida del rodet axial.....	53
Figura 12: Ventilador centrífug flux axial.....	54
Figura 13: Bufador del tipus "Root".....	54
Figura 14: Ventiladors centrífugs Soler & Palau.....	58
Figura 15: Ventiladors centrífugs Sodeca.	58
Figura 16: Col·lector de xoc.....	60
Figura 17: Cicló simple.	61
Figura 18: Comparació de cicló simple amb el cicló de gran eficiència.	62
Figura 19: Multi-cicló.....	63
Figura 20: Estructura d'un filtre de mànigues.	64
Figura 21: Filtres de medi porós de diferents formes i dimensions.....	65
Figura 22: Rentador de pols amb estrangulament de Venturi.	66
Figura 23: Tambor rentador d'aire.	66
Figura 24: Separador ciclònic de parets humides.	67
Figura 25: Principi de funcionament de la separació aire/producte mitjançant un camp elèctric.....	68
Figura 26: Vàlvula Rotativa.	69
Figura 27: Extractor de fons pla (vista explotada).	70
Figura 28: Extractors vibrants.	71
Figura 29: Manòmetre amb molla tubular amb senyal de sortida elèctrica.....	73
Figura 30: Transmissor de pressió diferencial.....	73

Figura 31: Sensor de temperatura superficial.	74
Figura 32: Sensors de temperatura de immersió	74
Figura 33: Placa d'orifici i brida d'orifici.	75
Figura 34: Esquema d'una tovera Venturi.....	76
Figura 35: Tovera de Venturi.	76
Figura 36: Nivell de sòlids de Paleta.	77
Figura 37: Nivell de sòlids Vibratori.....	77
Figura 38: Sensor de sòlids Capacitiu.	78
Figura 39: Sensor de sòlids de radiació magnètica.....	78

1. INTRODUCCIÓ

1.1 OBJECTE

L'objectiu d'aquest estudi és la confecció d'un mètode de càlcul per una instal·lació de transport pneumàtic per tal de, poder-ho aplicar en una futura línia de transport pneumàtic que servirà com a banc de proves per a una empresa del sector. S'estudiaran per separat els elements principals de la instal·lació i s'analitzaran els sensors i sistemes de mesura adients per a realitzar proves amb material pulverulent.

1.2 ABAST

- Confecció d'un full de ruta per el disseny d'una instal·lació de transport pneumàtic en fase diluïda en impulsió i una metodologia de càlcul de pèrdues de càrrega.
- Disseny d'una instal·lació (banc de proves).
- Confecció del Lay-out de la instal·lació.
- Caracterització dels equips principals de la instal·lació.

1.3 REQUISITS

Donat que es tracta d'un treball principalment d'estudi, les característiques a complir son les donades per el producte que es vulgui fer transportar per la instal·lació. Al ser un banc de proves on s'hi transportaran diferents materials pulverulents, la instal·lació haurà de ser molt versàtil i s'haurà d'adaptar als diferents materials que es transportin.

Els únics requisits importants venen a l'hora de fer el disseny d'una instal·lació i el Lay-out. Donat que, aquest treball es fa conjuntament amb una empresa dedicada al sector i que, aquesta línia de transport es pretén instal·lar posteriorment a una nau, propietat d'aquesta mateixa empresa, la instal·lació dissenyada haurà de complir les restriccions marcades per la empresa en quant a dimensions, transport, accessos...

1.4 JUSTIFICACIÓ DEL TREBALL

A l'hora de triar un treball, l'estudiant decideix en funció de les seves virtuts o preferències. En aquest cas particular, es va donar la oportunitat de fer pràctiques en una empresa dedicada al transport pneumàtic de materials pulverulents, un sector industrial que l'era desconegut per complet en aquell moment.

Amb el transcurs de les pràctiques, va ser informat per part de la empresa de la voluntat de dur a terme un petit banc de proves dins la mateixa empresa per tal de, transportar material pulverulent per una instal·lació pilot. Aquesta seria una manera d'aprendre més dels equips i mecanismes que, durant les pràctiques havia de tractar.

Durant el recorregut de la instal·lació pilot, s'instal·larien diferents sensors i equips de mesura per tal d'analitzar a posteriori o inclús en temps real paràmetres bàsics del transport pneumàtic com poden ser, temperatura, pressió, volum d'aire, porositat... I el comportament del material pulverulent durant la instal·lació, compactació, cavitació, condensació, d'entre altres.

Una vegada finalitzada la prova, la empresa tindria a l'abast eines suficients per reajustar els equips i poder repetir la prova tantes vegades com escaigués. Aquesta instal·lació permetria a la empresa provar el material en pols que el client necessiti transportar en les condicions marcades pel client i dimensionar els equips de la instal·lació de una manera molt més acurada que fent-ho analíticament.

2. DESENVOLUPAMENT

2.1 ANTECEDENTS I REVISIÓ DE L'ESTAT DE L'ART

Transport pneumàtic es el terme general donat al moviment de sòlids formats per partícules mes petites mesclades amb un gas que les transporta, es pot parlar de gas però, principalment el gas utilitzat es l'aire ja que, està a l'abast de tothom i té excel·lents propietats per al transport de partícules pulverulents.

Aquest transport es dona principalment per la influència ja sigui de la gravetat o, de la força produïda per una diferència de pressió entre l'aire que rodeja el material a transportar en la instal·lació i la pressió de l'aire a la descàrrega. Aquesta diferència de pressió tant pot ser positiva com negativa, en funció d'un o altre tindrem un sistema per impulsió o per aspiració, respectivament.

Durant molts anys s'ha fet servir l'ús de grans volums d'aire a pressions relativament baixes, essent petita la relació de sòlid fluïditzat en l'aire. Gràcies a la influència de noves tecnologies i de la recerca per part de empreses dedicades al sector, ha sigut possible desenvolupar una tecnologia capaç d'augmentar els nivells de sòlid transportat en l'aire. Al aparèixer noves metodologies de transport de material pulverulent, el transport pneumàtic aspira, en un futur pròxim, a generar un transport particular per a cada un dels materials en pols que es desitgin transportar.

A pesar de que s'ha aconseguit augmentar el percentatge de transport de sòlids en vers l'aire de subministrament, aquestes noves tecnologies també se les hi associa desavantatges que pel mètode tradicional no hi apareixen.

A continuació es desenvolupen els dos règims de flux de partícules en pols que anteriorment s'han esmentat.

El primer tipus de transport pneumàtic, el predominant i més utilitzat en enginyeria es, el transport pneumàtic en fase diluïda. Aquest, utilitza grans volums d'aire per tal de, mitjançant una diferència de pressió positiva o negativa, moure un producte a unes velocitats d'aire propulsor superiors als 20m/s. Una gran desavantatge respecte la fase densa es la reduïda concentració de pols fluïditzada en el gas, inferior al 1% en volum de gas, amb un caudal màxim de transport inferior a 10 tones hora. Per contra, aquest transport comporta pèrdues de càrrega molt

reduïdes, inferiors a 5mbar per metre per tant, no es necessària la utilització d'equips turbo-compresors per vèncer pèrdues de càrrega elevades que alhora, comporten grans inversions econòmiques. El transport en fase diluïda està molt limitat per a distàncies llargues de transport però, es l'únic transport de material en pols que pot treballar en pressions negatives (en buit). A causa de les altes velocitats de la mescla, productes fràgils i molt abrasius no son aconsellables de transportat amb fase diluïda ja que, hi hauria un gran deteriorament de les partícules en pols.

A continuació es mostren dues instal·lacions de transport pneumàtic de pols en fase diluïda per impulsíó (figura 1) i per aspiració (figura 2).

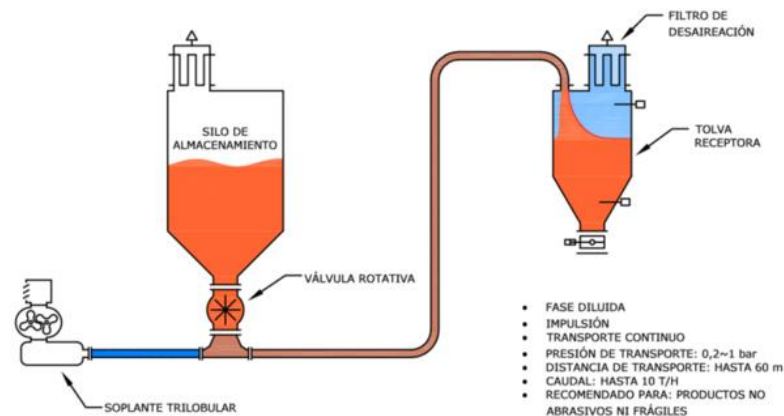


Figura 1: Transport pneumàtic en fase diluïda per impulsíó.

Durafix S.L. Transporte neumático, manejo de sólidos, Suministros industriales (<http://www.durafix.es/productos/transporte-neumatico/>) Consultat Maig10, 2016

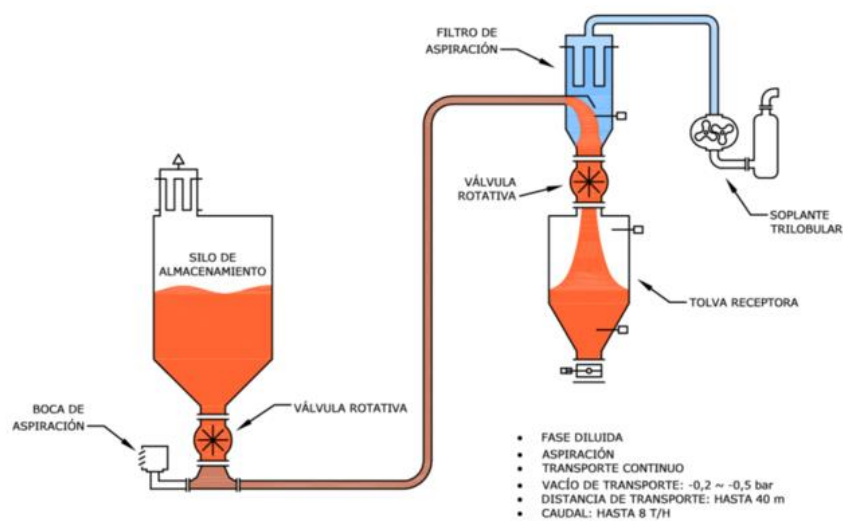


Figura 2: Transport pneumàtic en fase diluïda per aspiració.

Durafix S.L. Transporte neumático, manejo de sólidos, Suministros industriales (<http://www.durafix.es/productos/transporte-neumatico/>) Consultat Maig10, 2016

En l'altre extrem, s'hi troba el transport en fase densa que, es caracteritza per baixes velocitats del gas propulsor, entre 1m/s i 5m/s, i les altes concentracions de producte en pols, superiors al 30% en volum. En fase densa, degut a les altes concentracions de pols hi apareixen unes pèrdues de càrrega molt elevades, rondant els 20mbar el metre que comporten la obligació de instal·lar equips compressors, o turbo-compressors. Aquests equips requereixen d'una gran inversió econòmica.

Aquesta tecnologia cada cop es més freqüent en instal·lacions amb distàncies llargues de transport de material en pols, per el transport de producte fràgils (molt abrasius, amb baixa retenció d'aire, productes que no tendeixen a fluir...).

A la figura 3 es representa una instal·lació tipus d'un transport pneumàtic en fase densa.

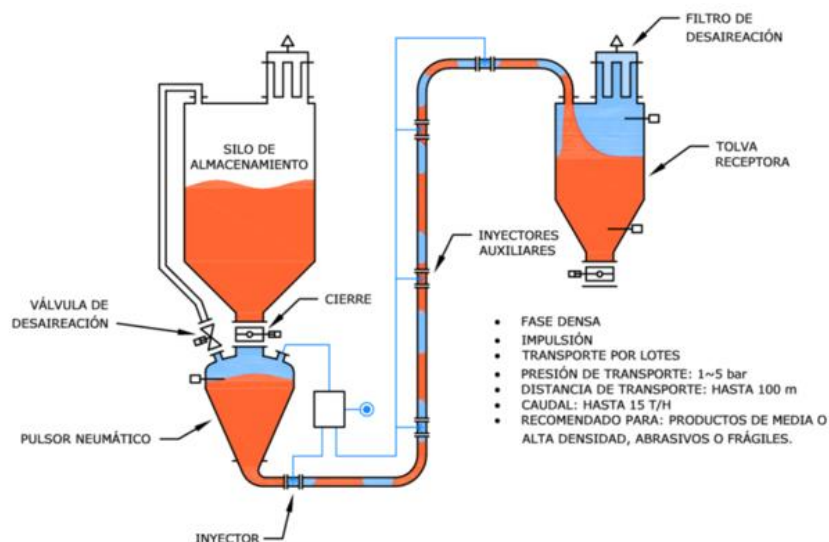


Figura 3: Transport pneumàtic en fase densa.

Durafix S.L. Transporte neumático, manejo de sólidos, Suministros industriales
(<http://www.durafix.es/productos/transporte-neumatico/>) Consultat Maig10, 2016

2.2 METODOLOGÍA DE CÀLCUL

2.2.1 Anàlisi del producte

2.2.1.1 Anàlisi Granulomètric

Abans de començar a dissenyar una instal·lació de transport pneumàtic es imprescindible respondre's a les següents preguntes: ¿Quin material s'ha de transportar?, ¿Quines son les propietats d'aquest material?, ¿Quina quantitat d'aquest material s'ha de transportar? i, ¿En quant temps?

Depenent de les respostes a les preguntes anteriors el sistema que s'utilitzarà per transportar aquest material serà un o altre.

¿Quin material s'ha de transportar?

La caracterització e identificació del material a transportar es imprescindible per preveure com evolucionarà el producte al llarg de la instal·lació. A aquesta part del treball se la coneix com anàlisi granulomètric.

Un material pulverulent es un grup de partícules que, juntes, formen una massa. Un material que es presenta en estat pols. Per tant, qualsevol tipus de material que compleixi aquests requisits se'l pot considerar com a tal.

En el disseny de sistemes de transport pneumàtic de materials en pols, es de vital importància conèixer les propietats particulars del material a transportar. Cada material té unes propietats que varien dràsticament les unes de les altres, en funció de la dimensió, de la distribució de gra, de l'angle de talús, de la humitat, de la temperatura, de la resistència a fricció, etc.

Per descriure'ls també es defineixen diferents característiques tals com material "abrasiu", "cohesiu", "delicat", "calent", "humit", "no flueix", etc. Si a sobre d'això, se li afegeix la gran diversitat de procedència de la matèria prima, l'anàlisi granulomètric i l'estudi particular de cada material passa a ser una obligació.

El càlcul matemàtic s'haurà d'efectuar per a cada partícula o definir una fracció de dimensió determinada, i desenvolupar càlculs per a cada dimensió o fracció de dimensions existents.

En conclusió, l'anàlisi granulomètric estudia el comportament del material a transportar. La naturalesa del producte, les propietats de les partícules aïllades i finalment del sistema en conjunt.

Per començar l'estudi granulomètric és important fer una mesura del volum ocupat per una massa de sòlids compacta, de tal forma que es trobin els mínims interstícis entre les partícules. Aquest valor se li associa el nom de densitat absoluta.

$$\rho_{abs} = \frac{W}{g * V_{comp}} = \frac{m_c}{V_{comp}} \quad \text{Equació 1}$$

Un altre paràmetre del material es la anomenada densitat a granel o densitat relativa la qual es calcula agafant la mateixa massa que en la equació anterior però en un volum sense compactar.

$$\rho_{rel} = \frac{W}{g * V_{rel}} = \frac{m_c}{V_{rel}} \quad \text{Equació 2}$$

Una vegada trobades les densitats es poden relacionar per trobar un paràmetre clau per a la caracterització del material, la porositat.

La porositat d'un material es un coeficient adimensional que mesura la quantitat d'interstícis en un material sòlid o el que es el mateix, el percentatge de volum total de gas dins el volum total de la mescla.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volum de buits de gas}}{\text{Volum total de la mescla}}$$

A partir de la definició es pot extreure que:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{rel}}{\rho_{abs}} \quad \text{Equació 3}$$

Un altre manera de calcular la porositat seria de la següent forma:

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{A * \rho_s * V_s} \quad \text{Equació 4}$$

D'on sempre:

$$\rho_{abs} > \rho_{rel}$$

Les equacions 3 i 4 tenen una gran utilitat pràctica prenent com a hipòtesi la homogeneïtat del material pulverulent.

A continuació, es duria a terme la mesura de la mida de gra de les partícules pulverulents. Existeix una gran varietat de mides de gra i a l'hora també una gran varietat d'eines per a poder efectuar aquestes mesures.

Per a mides de gra superiors a 5mm (de diàmetre), la mida de gra es prou gran com per poder utilitzar un peu de rei o un cargol micromètric per el contrari, per a mides de gra inferiors a 0,04mm (de diàmetre) s'han d'efectuar mètodes indirectes de mesura.

Els mètodes de mesura indirecte més utilitzats son les malles o tamisos. D'altres mètodes com la sedimentació (gravetat i centrífuga), el coulter, la difracció làser i la microscòpia (òptica i electrònica) tenen el seu ús per a mides de gra molt petites, inferiors a 2µm.

Les malles o tamisos, son dels mètodes de mesura més utilitzats, tenen unes petites obertures d'un diàmetre estandarditzat per a què partícules de mides superiors es quedin retingudes i les partícules d'aquella mesura o inferior passin pel tamís. Aquests tamisos es classifiquen en funció del número de Mesh.

Abertura en mm	USA standard ASTM E 11-61	Número mesh de Tyler (mesh/in.)	British standard (mesh/in.)
0,037	400	400	—
0,044	325	325	—
0,045	—	—	350
0,053	270	270	300
0,063	230	250	240
0,074	200	200	—
0,075	—	—	200
0,088	170	170	—
0,090	—	—	170
0,105	140	150	150
0,125	120	115	120
0,149	100	100	—
0,150	—	—	100
0,177	80	80	—
0,180	—	—	85
0,210	70	65	72
0,250	60	60	60
0,297	50	48	—
0,300	—	—	52
0,354	45	42	—
0,355	—	—	44
0,420	40	35	35
0,500	35	32	30
0,595	30	28	—
0,600	—	—	25
0,707	25	24	—
0,710	—	—	22
0,841	20	20	—
1,00	18	16	16
1,19	16	14	—
1,20	—	—	14
1,41	14	12	—
1,68	12	10	10
2,00	10	9	8

Taula 1: Classificació de les dimensions de partícula en funció de diferents paràmetres estandarditzats.

Carlos Eduardo Núñez. Tabla de comparación entre abertura de malla (cuadrada) y el número mesh de los sistemas ASTM, Tyler y British Standard 2008 [www.cenunez.com.ar]. Consultat Maig20, 2016

Al tractar amb materials pulverulents amb mides de gra tant petites, es imprescindible tenir en compte que la instal·lació ha de tenir certes proteccions per què, els operaris que treballin a la planta puguin treballar sense ningun tipus de risc. En funció d'aquesta mida de gra, la instal·lació de transport pneumàtic necessitarà mes o menys proteccions per evitar el contacte amb el cos humà.

En el següent esquema es pot apreciar en funció de la mida de gra, les parts del cos que es veuen més afectades, els problemes més important en els quals s'han de tenir més presents son, els de caràcter respiratori i oculars.

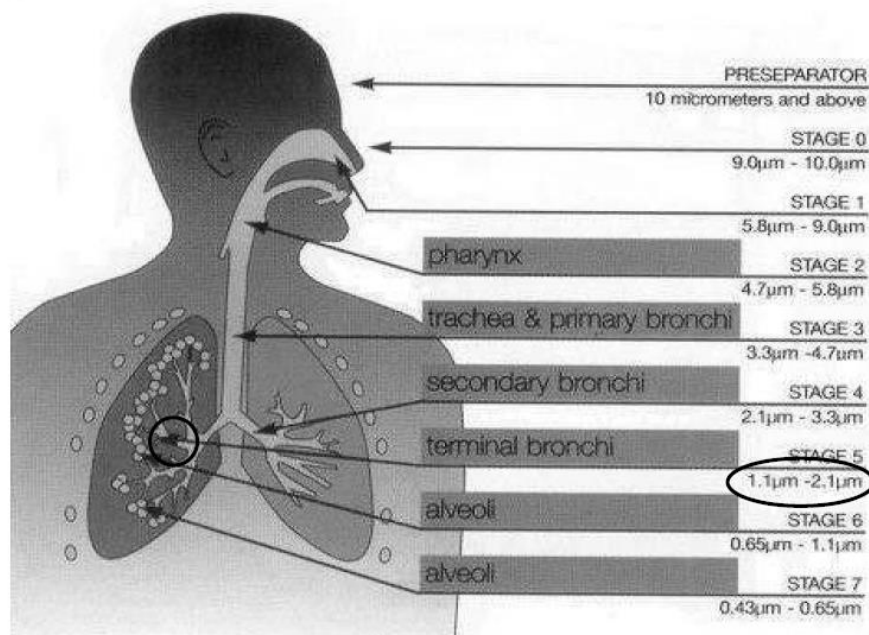


Figura 4: Perillositat del material pulverulent en funció de la mida de gra.
Font: Mercedes Fernández Arévalo. Modulo III Sección 1 Solidos Pulverulentos (2012)

En cas de no fer servir elements de protecció individual (EPI's) el treballador d'una planta de transport pneumàtic posa en risc la seva salut quedant exposat a patir els problemes que a continuació s'esmenten¹:

Efectes respiratoris

- Neumoconiosis.
- Càncer pulmonar.
- Càncer nasal.
- Irritació respiratòria.
- Al·lèrgia.
- Bisinosis.

- Infecció respiratòria.

Efectes generals

- Intoxicació: Hi ha materials que una vegada inhalats poden passar a la sang (manganès, plom, cadmi...)

Altres efectes

- Lesions de pell: Irritació cutània i dermatosi.
- Conjuntivitis.
- Risc d'explosió.

Per a evitar les sortides de pols a l'atmosfera que podria, no només tenir repercussions a nivell del operari com s'ha comentat anteriorment sinó que, també podria tenir repercussions mediambientals, les instal·lacions que treballen amb material en pols utilitzen separadors pols aire (en l'apartat 2.5 del treball es parlarà de separadors aire producte en més detall).

Una vegada mesurades les geometries bàsiques del gra: densitats característiques, porositat, esfericitat, elongació, circularitat, etc. Ja està definida la unitat de pols. Per saber el comportament de la totalitat del material, com a conjunt, es necessari el següent pas, l'anàlisi reològic.

2.2.1.2 Anàlisi Reològic

La Reologia es la ciència del flux que estudia la deformació d'un cos sotmès a esforços externs i descriu la interrelació entre força, temps i deformació. Dóna les característiques de viscositat de pols, fluids i semi-sòlids. El seu estudi es essencial en moltes indústries incloent, plàstics, pintura, alimentació, detergents, etc.

En el cas de l'anàlisi reològic en un material pulverulent enfocat al transport pneumàtic, es tracta de sotmetre el material pulverulent, en conjunt, a diferents proves per tal de mesurar, el grau de higroscopicitat, càrregues elèctriques, deformació, capacitat de sedimentació, angle de repòs, velocitat de flux, entre altres.

Per efectuar aquestes proves sobre el material, es necessària una preparació i estandardització de la mostra. Aquesta preparació i estandardització sobre la mostra de pols consisteix en un desplaçament lleuger per a evitar atapeïment, airejar la pols o per extreure'n excessos d'aire en el seu interior.

Una vegada finalitzades les etapes de preparació i estandardització del material pulverulent es determina el paràmetre bàsic de fluïdesa del material en qüestió, la energia bàsica de fluïdesa².

L'energia bàsica de fluïdesa (BFE) es l'energia necessària per a desplaçar un volum constant de pols condicionat adequadament seguint un patró i una velocitat de flux determinats. Amb el valor de l'energia bàsica de fluïdesa es calculen uns índexs basats en aquest anterior anomenats, mesures estàndard.

Les mesures estàndard avaluen els canvis de la pols en funció de diferents influències i, orienten a l'enginyer a interpretar la resposta d'aquest producte en condicions reals. Aquestes es divideixen en: Índex d'estabilitat (SI), Índex de velocitat de flux (FRI), Raó de ventilació, Índex de compactació.

Una vegada realitzat l'anàlisi granulomètric i anàlisi reològic l'enginyer pot estimar el comportament d'aquest material en una instal·lació.

Els estudis de Geldart i Jenike^{3,4} van fer possible categoritzar els productes, una vegada analitzats.

Geldart⁵ va dividir els materials en funció de les capacitats de fluïdificació i de retenció d'aire, classificant els materials en quatre grans grups:

- A. Pols de gra fi a baixa densitat, bona fluïdització i retenció d'aire.
- B. Pols de gra mig amb densitat mitja, fluïdifica bé i retenció d'aire baixa.
- C. Pols de gra fi amb densitat alta, cohesius, difícils de fluïditzar i mala retenció d'aire.
- D. Pols de gra gros amb densitat alta, no fluïdifica i sense capacitat de retenció d'aire.

Jenike descriu la capacitat de fluir dels productes en gra mitjanant la seva funció de flux (FFC) i ofereix així una classificació general del comportament dels

materials pulverulents a la sortida dels depòsits diferenciant els productes en els següents apartats:

Fluyendo Libremente: $10 \leq FFC < \infty$

Fluyendo: $4 \leq FFC < 10$

Cohesivo: $2 \leq FFC < 4$

Muy cohesivo: $1 \leq FFC < 2$

No fluye (se endurece): $FFC < 1$

Grafica de fluidez	Productos de referencia	Descripción	Clasificación según Geldart	Clasificación según Jenike	Procedimientos de transporte
	Carbonato cálcico, Cemento, Cal, PVC	Bien fluidificable Buena capacidad de retención de aire	Grupo A: Granulometría fina y / o ligero materia	Fluidificado $10 \leq FFC < \infty$, fluyendo libremente No fluidificado $2 \leq FFC < 4$, cohesivo	Transporte en fase diluida Transporte en fase densa Transporte en fase densa por vacío y baches
	Arena, cenizas de lecho fluido, granulados	Mal fluidificable Mala capacidad de retención de aire	Grupo B: Granulometría media y / o pesado	$4 \leq FFC < 10$ fluyendo	Transporte en fase diluida Transporte por empuje de cartuchos Transporte por vacío en cartuchos
	Creta, bióxido de titanio, óxidos, metálicos, leche en polvo	Desde cohesivo hasta muy cohesivo Ninguna capacidad de retención de aire Agujero de ratones	Grupo C: Granulometría fina y / o pesado	$2 \leq FFC < 4$ cohesivo $1 \leq FFC < 2$ muy cohesivo	Transporte por empuje en cartuchos con válvula de impulsos y estación relé Transporte en fase densa con tubería auxiliar Transporte por vacío en cartuchos
	Azúcar, nueces, sal, almendras, sémola, verdura congelada, granulados	Desde cristalino hasta granulado Ninguna capacidad de retención de aire No fluidificables	Grupo D: Granulometría gruesa y / o pesado	$4 \leq FFC < 10$ fluyendo	Transporte por empuje de cartuchos Transporte por empuje en cartuchos con válvula de impulsos y estación relé Transporte por vacío en cartuchos
	Mezclas finales, composición de vidrio, sílice pirogénica, mezclas	Mala capacidad de retención de aire La fluidificación produce disgregación	Grupo C hasta D: Fino y / o pesado hasta grueso y / o pesado	Depende de finos $2 \leq FFC < 4$ Cohesivo hasta fluyendo	Transporte por empuje en cartuchos con válvula de impulsos y estación relé Transporte por vacío en cartuchos
	Arenas húmedas, mezclas, productos centrifugados en húmedo	Ninguna capacidad de retención de aire No fluidificables Conformables	Comparable con Grupo C, fino hasta grueso y húmedo	$FFC < 1$ No fluyendo hasta pegajoso	Transporte por empuje en cartuchos con válvula de impulsos y estación relé
	Productos atomizados, chips, perlita, percarbonato, ácidos adípicos, píldoras	Productos sensibles, aglomerados, Ninguna capacidad de retención de aire No fluidificables.	Grupos B y D: Granulometría media hasta gruesa y / o pesado	$4 \leq FFC < 10$ Fluyendo	Transporte por empuje en cartuchos con válvula de impulsos y estación relé Transporte por vacío en cartuchos
	Productos abrasivos	Todos los productos desde una dureza Mohs de aprox. 4	No clasificables	$1 \leq FFC < 10$ Dependiendo de la granulometría	Transporte en fase densa con tubería auxiliar Transporte por empuje en cartuchos con válvula de impulsos y estación relé Transporte por vacío en cartuchos
	Material reciclado, cascotes	No fluidificables Ninguna capacidad de retención de aire	Comparable con Grupos B-D	$2 \leq FFC < 4$ No fluyendo	Transporte en fase diluida Transporte por empuje en cartuchos con válvula de impulsos y estación relé

Taula 2: Material i classificació segons Geldart i Jenike.

Hermann J. Linder. CEO de Solids Solution Group (2011) Sistemas de transporte neumático-Una recopilación de soluciones acreditadas, incluso para productos difíciles y problemáticas complejas.

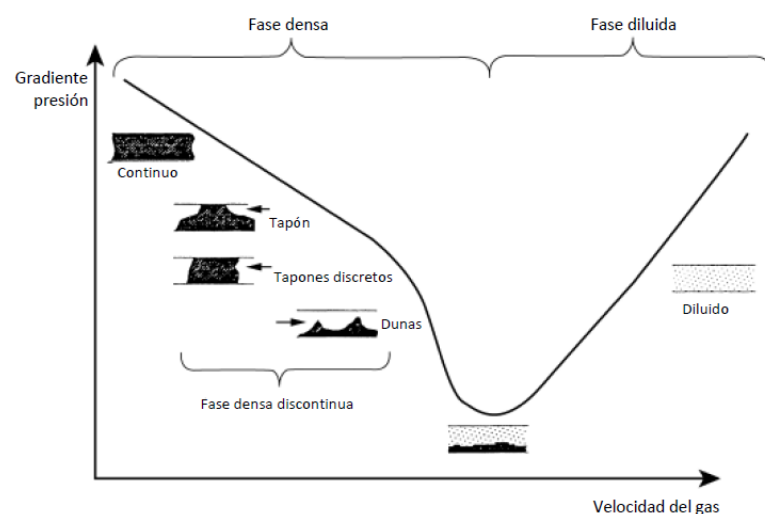
2.2.2 Anàlisi Cinètic.

En una instal·lació de transport pneumàtic com la estudiada en aquest treball, on hi apareixen dues fases (sòlid, gas), hi apareixen diferents velocitats les quals han de ser estudiades per aconseguir controlar al màxim el funcionament de la instal·lació a posteriori.

Treballant en fase diluïda, com es el cas, el equip impulsor (compressor) impulsa aire a una certa velocitat, aquest aire en un cert moment de la instal·lació entra amb contacte amb el material pulverulent el qual es mescla i es transporta de manera uniforme cap a la zona de descàrrega on, la pols i l'aire son separats mitjançant un separador aire/producte. Per tant, de manera generalista es pot preveure que hi haurà les següents velocitats en el sistema: la velocitat de l'aire, la velocitat de la pols, i la velocitat de lliscament.

En el gràfic 1 es representa el tipus de transport en funció de pressió i velocitat del gas. Com es pot apreciar, el límit entre la fase densa i diluïda apareix el "flux de saltació", se'l coneix d'aquesta manera per el simple fet que, en aquell moment, s'aprecia com el material comença a "saltar" o bombollejar, d'aquí el nom que el representa.

En funció del producte que es vulgui transportar, aquest límit estarà situat més a la dreta de la gràfica per tant, necessitarà mes velocitat de gas per poder elevar-se o pel contrari, estarà situat més a l'esquerra de la gràfica per tant, necessitarà menys velocitat de gas per poder elevar-se o fluïditzar-se.



Gràfic 1: Patrons de flux.
Font: Rhodes (2003).

En una instal·lació de transport pneumàtic s'ha de tenir en compte que, al treballar amb material pulverulent hi ha risc de obturació de les canonades. Es per això, que hi ha dues velocitats bàsiques per al dimensionament d'una instal·lació d'aquestes característiques, la velocitat de bloqueig en transport vertical i la velocitat de ruptura en transport horitzontal.

Velocitat de bloqueig en transport vertical.

En el transport de material en pols en canonada vertical, el material en pulverulent rep l'impuls donat per l'equip impulsor i té tendència a aixecar-se mentre que alhora, rep una força contrària al moviment deguda al seu propi pes i a la fricció amb la canonada.

Per tant, si l'impuls donat per l'equip impulsor es superior a la forces anteriorment citades, el material pujarà. El problema bé donat quan, disminueix la velocitat del gas i aquesta força impulsora no es suficient per vèncer les altres forces.

Si disminueix la velocitat del gas, disminueix la velocitat de la mescla i per tant, també disminueixen els efectes de fricció de la mescla amb la canonada però, la concentració de sòlids augmentarà cosa que repercutirà en que la altura estàtica necessària per sostenir aquesta massa de sòlid també augmentarà.

La relació entre la velocitat del gas i el gradient de pressió en funció de la longitud per el transport en canonades verticals es mostra al gràfic 2.

La línia AB representa les pèrdues de càrrega per fricció causades per l'efecte del gas (sense pols) en una canonada vertical.

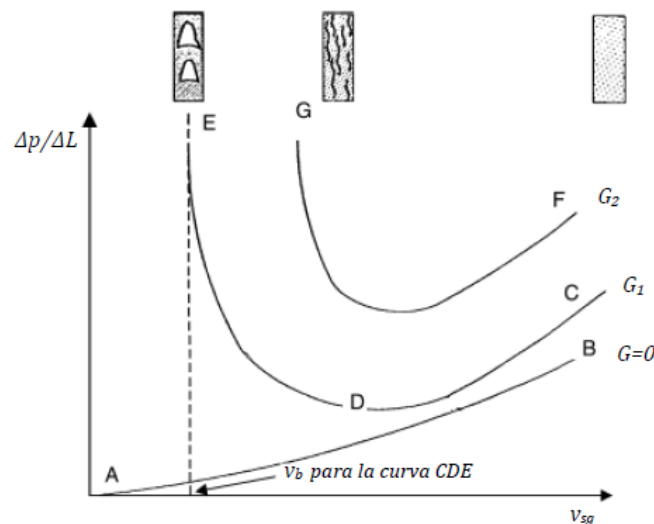
La corba CDE hi afegeix un flux de sòlids G_1 , i la corba representada a sobre d'aquesta, FG, es per una velocitat major d'alimentació G_2 .

Tant en el punt C com el punt F, la velocitat del gas es alta, la concentració de sòlids baixa, i una alta interacció fluid-paret per tant, no hi ha problemes de bloqueig de la línia.

Si la velocitat disminueix per sota del punt D, comença a augmentar la massa de sòlids en suspensió, disminueix la fricció amb les parets però, augmenta la altura estàtica per el que, augmenta el gradient de pressió.

A la regió DE, la disminució de la velocitat del gas causa un ràpid increment de la concentració de sòlids en suspensió, i arriba al punt en el qual el gas ja no pot sostenir tota aquesta pols. En aquest punt, es forma un llit fluïditzat a la canonada. Aquest fenomen es conegut com “bloqueig” i usualment comporta grans fluctuacions de pressió. La velocitat de bloqueig, V_b , es la velocitat més baixa a la qual es possible operar en fase diluïda per el cabal G_1 .

Per cabals de sòlid superiors, com es el cas de G_2 , la velocitat de bloqueig es major. Per tant, es pot dir que, la velocitat de bloqueig marca el límit entre el transport pneumàtic en fase densa i fase diluïda en canonades verticals. Aquest fenomen tant pot ser donat per una disminució de velocitat del gas per un caudal de sòlids constant, com per el cas contrari, augmentant el cabal de sòlids amb una velocitat de gas constant.



Gràfic 2: Velocitat de la mescla en canonada vertical en funció del gradient de pressió aplicat.
Font: Rhodes (2003).

Teòricament, no es possible preveure les condicions a les quals succeirà aquest fenomen però, donat a la experiència, Punwani et al. (1976) va confeccionar una relació per poder identificar la velocitat de bloqueig d'un producte basada en els anys de treball de camp.

$$\frac{V_b}{\varepsilon_b} - V_b = \frac{M_s}{\rho_s * (1 - \varepsilon_b)}$$

Equació 5

$$\rho_g^{0,77} = \frac{2250 * D * (\varepsilon_b^{-4,7} - 1)}{\left(\frac{V_b}{\varepsilon_b} - V_t\right)^2}$$

Equació 6

Les equacions 5 i 6 s'han de resoldre a l'hora per tal de trobar els valors adequats de V_b i ε_b .

Velocitat de ruptura en transport horitzontal.

Si una instal·lació de transport pneumàtic pot obstruir-se en canonada vertical, també es possible la obturació de les canonades en canonada horitzontal. Per tant, també hi ha problemàtica per transportar material pulverulent en sentit horitzontal.

En aquest cas, la força d'impulsió del equip compressor ha de vèncer les forces de fricció amb la canonada i les forces d'acceleració de la mescla. Si aquesta força venç a les anteriors, la canonada no s'obturarà. Què succeeix al disminuir la velocitat del gas impulsor?

La dependència general entre la velocitat del gas i el gradient de pressió en funció de la longitud per un transport pneumàtic horitzontal es mostra al gràfic 3.

Com en el cas anterior, la corba AB mostra la pèrdua de càrrega en funció de la velocitat del gas en la cas de no tenir transport de material pulverulent (sense pols).

En segon lloc, la corba CDEF, representada a sobre de la anterior, mostra la pèrdua de càrrega en funció de la velocitat de la mescla, d'un flux màssic determinat G1.

Per finalitzar la corba GF, representada a la part superior del gràfic, mostra la pèrdua de càrrega en funció de la velocitat de la mescla, d'un flux màssic G2 major que G1.

Tant en el punt C com en el punt G, la velocitat del gas es tan elevada com per poder transportar tot el material de manera molt diluïda en el propi gas. El risc d'obturació en aquest cas es nul. Les partícules sòlides son previngudes de l'assentament a les parets de les canonades per petits remolins circulants, creats per el propi flux d'aire transportador.

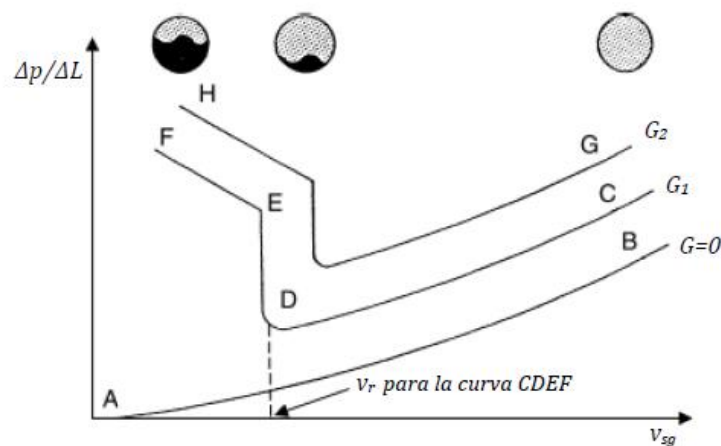
Si la velocitat del gas circulant disminueix, també ho fa el gradient de pressió. Disminueix la fricció de la mescla amb les parets però, augmenta la concentració de sòlids a la canonada.

En el punt D, el gas ja no té prou força com per mantenir elevat tot el material en suspensió per tant, part d'aquest material en pols comença a sedimentar-se al fons de la canonada, per efecte de la gravetat.

La velocitat del gas a la qual succeeix aquest fenomen se li associa el nom de velocitat de "ruptura"^a. Un decrement de la velocitat del gas provocaria un augment exponencial de la concentració de material en pols sedimentat al fons de la canonada i un augment notable de les pèrdues de càrrega causades per una obturació de la canonada de transport.

A la regió EF, hi ha transport en fase diluïda, a la part superior de la canonada, i en fase densa a la part sedimentada, la part inferior, a aquest fenomen se li associa el nom de transport de "dunes" (dune flow).

La velocitat de ruptura marca el límit entre el transport en fase diluïda (part dreta del gràfic) i el transport en fase semi-densa o densa (part esquerra del gràfic).



Gràfic 3: Velocitat de la mescla en canonada horitzontal en funció del gradient de pressió aplicat.
Font: Rhodes (2003).

^a En anglès "Saltation velocity"

Com succeeix amb la velocitat de bloqueig, trobar una relació teòrica que marqui el punt exacte de ruptura per un determinat producte no existeix. No obstant, existeixen diferents correlacions per poder preveure la velocitat de ruptura.

La correlació de Rizk (1973), basada en l'enfoc teòric—pràctic, té un error mitjà de $\pm 50\%$ però, es relativament fàcil de utilitzar.

$$\frac{M_s}{\rho_g * V_r * A} = \left(\frac{1}{10^{(1440 * \bar{x} + 1,96)}} \right) * \left(\frac{V_r}{\sqrt{g * D}} \right)^{(1100 * \bar{x} + 2,5)} \quad \text{Equació 7}$$

Una vegada resoltes les equacions 5, 6 i 7 i, trobats els valors de la velocitat de bloqueig i ruptura de la instal·lació per al nostre producte, s'han d'avaluar els resultats, si els resultats estan dins dels paràmetres que es consideren òptims per al transport pneumàtic en fase diluïda es procedeix amb el mètode.

En una instal·lació de transport pneumàtic la velocitat més important de les dues a dalt esmentades es la velocitat de ruptura o també anomenada velocitat de "saltació", ja que es, la major de les dues (sempre es prendrà la velocitat major per a superar les dues velocitats límit).

La velocitat superficial de disseny del gas es el producte de, aquesta última per un factor de seguretat, en aquest factor de seguretat es contemplin pèrdues de càrrega afegides, insuficiència de pressió d'entrada del compressor, petites fuites d'aire en punts de la instal·lació, etc.

$$V_o = 1,5 * V_r \quad \text{Equació 8}$$

Amb la velocitat superficial del gas, es possible trobar una equació que relacioni aquesta velocitat i la velocitat dels sòlids en pols.

$$V_s = V_o * (1 - 0,0638 * \bar{x}^{0,3} * \rho_s^{0,5}) \quad \text{Equació 9}$$

Amb la porositat ε del material es possible trobar la velocitat intersticial del gas, la velocitat amb la que es treballarà durant el dimensionament de la instal·lació.

$$V_g = \frac{V_o}{\varepsilon} \quad \text{Equació 10}$$

Finalment, ja estan totalment definides les velocitats del material pulverulent i del gas impulsor respectivament. Per tant, ara es possible trobar la velocitat de lliscament.

$$V_{slip} = V_g - V_s$$

Equació 11

Amb tots els paràmetres trobats en el anàlisi granulomètric, reològic i cinètic juntament amb les dades de la instal·lació ja es possible calcular les pèrdues de càrrega del sistema per el cas estudiat en aquest projecte.

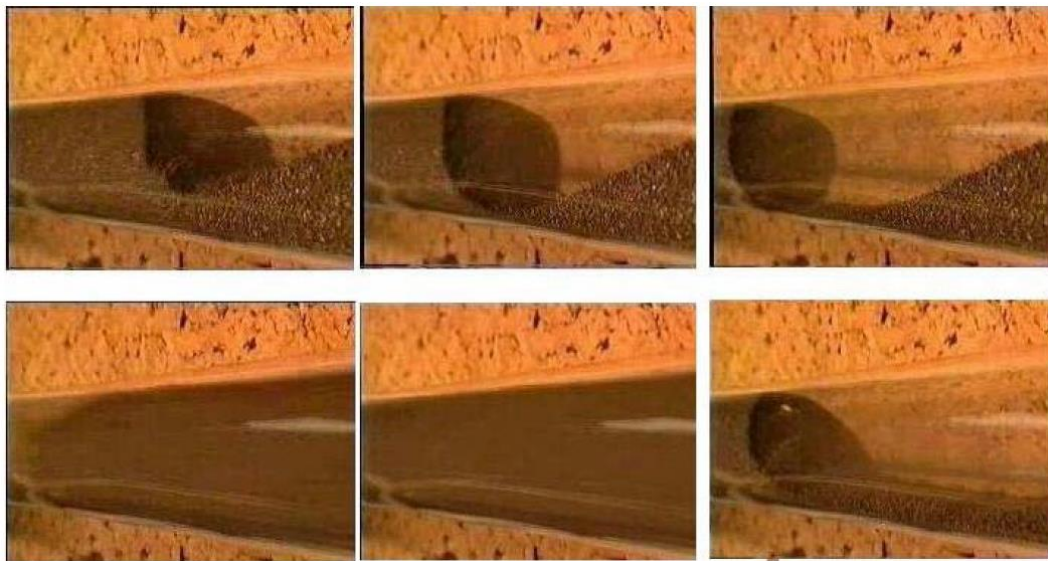


Figura 5: Seqüència d'obtenció d'una canonada horitzontal.

Universidad de Talca Facultad de Ingenieria, Rediseño del sistema de transporte neumático para aserrín-polvo de la fabricación de palos de helados de temsa (talca). Roberto Luis Inzulza Ayala (2008).

2.2.3 Pèrdues de càrrega

Per dur a terme una metodologia de càlcul que es farà servir per dimensionar els equips imprescindibles en un banc de proves de transport pneumàtic de material pulverulent, s'ha recopilat informació sobre diferents metodologies de càlcul de pèrdues de càrrega analítiques que s'han fet servir a l'hora de dissenyar instal·lacions de transport pneumàtic que ja estan en funcionament.

Abans de res, es imprescindible identificar les diferents pèrdues de càrrega i, classificar-les en funció de la rellevància.

- Principals
 - Fricció amb la canonada
 - Acceleració de la mescla
 - Efectes gravitacionals
- Secundàries
 - Canvis de direcció (Colzes)
 - Accessoris

Seguidament, es desglossen les diferents pèrdues de càrrega i els diferents mètodes de càlcul que s'han utilitzat en aquest treball^b.

2.2.3.1 Pèrdues de càrrega principals.

2.2.3.1.1 Pèrdues de càrrega per fricció amb la canonada.

En una instal·lació en la qual s'hi transporta material pulverulent a gran velocitat, es impensable que no hi hagin pèrdues de càrrega per fricció. En funció del sistema de transport que es dugui a terme, les pèrdues de càrrega seran majors o menors.

En el cas de transport pneumàtic en fase diluïda les pèrdues de càrrega per fricció son molt elevades ja que es el tipus de transport que utilitza un percentatge de transport de material pulverulent més petit i una velocitat de transport més elevada. Per contra, en el transport pneumàtic en fase densa, com les velocitats de transport son molt més petites les pèrdues de càrrega per fricció es redueixen molt.

^b La utilització d'aquestes fórmules i mètodes per arribar a trobar les pèrdues de càrrega totals d'una instal·lació, n'exclou d'altres de igual o més validesa que aquestes però, és impossible fer-ne ús de totes elles.

Finalment, en el cas de tenir un transport en fase semi-densa, les pèrdues de càrrega romandran entre els valors de les pèrdues per fricció de la fase diluïda i densa.

Dins de les pèrdues de càrrega degudes a la fricció en les canonades hi ha mètodes analítics que engloben moltes casuístiques, (molt generalistes) com es el mètode 1, i d'altres que son molt més explícits, molt més detallats en la distinció de pèrdues de càrrega com es el mètode 2, aquí s'exposen les dues versions més antagonistes, finalment s'haurà de decidir entre quina de les opcions es més vàlida en aquest treball.

Mètode 1 (Pèrdues de càrrega per fricció)

$$\lambda_2 * V_m * \varphi * \left(\frac{L}{D}\right)$$

Equació 12

A continuació, s'exposa una metodologia de càlcul de les pèrdues per fricció, molt més detallada la qual diferencia les pèrdues de càrrega en canonada horitzontal, vertical i, diferenciant la pols de l'aire.

En el cas de tenir un transport en fase diluïda on el material pulverulent té molt bones propietats de fluïdització i homogeneïtzació amb l'aire, l'equació 12 simplificarà molt els càlculs.

Per al transport d'un material pulverulent amb dificultats d'homogeneïtzació amb l'aire les pèrdues de càrrega degudes a l'aire i a la pols seran molt diferents per tant, analitzar-les per separat tindrà com a resultat una millor aproximació a la resposta real de la instal·lació.

Mètode 2 (Pèrdues de càrrega per fricció)

Pèrdues de càrrega per fricció en canonades horitzontals.

S'ha de tenir en compte que aquesta pèrdua de càrrega bé donada per dues, una deguda a l'aire i l'altre a la pols⁶. Per tant, en un sistema de transport pneumàtic de material pulverulent la pèrdua de càrrega serà la resultant de la suma de les equacions 13 i 16.

Degut a l'aire:

$$2 * f_g * \rho * V_g^2 * \frac{L_h}{D} * \varepsilon$$

Equació 13

El factor de fricció de l'aire contra la canonada bé donat per l'equació desenvolupada per Blasius⁷ on desenvolupa que:

$$f_g = 2 * (0,0396 * Re^{-0,25})$$

Equació 14

On el número de Reynolds es calculat de la següent forma:

$$Re = \frac{V_g * \rho * D}{\mu}$$

Equació 15

Degut a la pols:

$$2 * f_{s,H} * \rho_s * V_s^2 * \frac{L_h}{D} * (1 - \varepsilon)$$

Equació 16

On:

$$f_{s,H} = \frac{6}{8} * \frac{\rho}{\rho_s} * C_D * \frac{D}{\bar{x}} * \left(\frac{V_g - V_s}{V_s} \right)^2$$

Equació 17

Amb coeficient d'arrossegament:

$$C_D = \frac{12}{Re'} * (1 + 0,15 * Re'^{0,687})$$

Equació 18

Vàlid només quan:

$$0,2 < Re < 2000$$

El número de Reynolds s'extreu de la següent fórmula:

$$Re' = \frac{(V_g - V_s) * \rho * \bar{x}}{\mu}$$

Equació 19

Pèrdues de càrrega per fricció en canonades verticals.

En aquest cas, com a l'anterior, les pèrdues de càrrega es poden dividir en, les causades per el fregament de l'aire amb l'interior de la canonada i les causades per el fregament del material transportat amb l'interior de la canonada.

Degut a l'aire:

$$2 * f_g * \rho * V_g^2 * \frac{L_v}{D} * \varepsilon \quad \text{Equació 20}$$

El coeficient de fricció de l'aire amb les parets de l'interior de la canonada segons Blasius no varia en funció de la alineació de la canonada per tant, es pren la equació 14 com a vàlida per a l'equació 20.

Degut a la pols:

$$2 * f_{s,v} * \rho_s * V_s^2 * \frac{L_v}{D} * (1 - \varepsilon) \quad \text{Equació 20}$$

On:

$$f_{s,v} = \frac{0,057}{2} * \frac{D}{V_s} * \sqrt{\frac{g}{D}} \quad \text{Equació 21}$$

2.2.3.1.2 Pèrdues de càrrega per acceleració de la mescla.

En una instal·lació de transport pneumàtic el producte es dissolt en aire per poder-lo fer córrer per una línia fins arribar a una destinació final on el producte serà abocat.

Inicialment, el producte està en repòs, per tant, es necessària una força que impulsi el producte, aquesta força es transmet en pèrdua de càrrega deguda a una acceleració que ha de fer necessàriament la mescla, producte i aire, per passar de velocitat nul·la fins a velocitat de transport.

Es difícil saber o calcular la distància de canonada en la qual la mescla està essent accelerada fins a la velocitat de transport però, s'estima que la distància de canonada on s'accelera el producte oscil·la al voltant del 5% del total en metres de canonada en la instal·lació.

En funció del sistema de transport pneumàtic que s'esculli o es desitgi en el treball, s'obtindran unes pèrdues de càrrega per acceleració majors o menors.

En un sistema de transport pneumàtic en fase diluïda l'esforç que ha de fer el sistema per accelerar les partícules pulverulents es menor que en el cas del transport pneumàtic en fase semi-densa o densa ja que en els dos últims sistemes,

el sistema propulsor ha de vèncer una major superfície de treball, això es tradueix en unes pèrdues de càrrega per acceleració de la mescla superiors.

Mètode 1 (Pèrdues de càrrega per acceleració de la mescla)

$$\lambda_1 * V_m * \varphi$$

Equació 22

El mètode 2 per l'altre banda, diferencia les pèrdues de càrrega causades per l'aire i les causades per la pols. En aquest apartat es pot apreciar que la posició de la canonada es irrellevant per el càlcul, tant per la horitzontal com la vertical.

Mètode 2 (Pèrdues de càrrega per acceleració de la mescla)

Degut a l'aire:

$$\frac{1}{2} * \rho * \varepsilon * V_g^2$$

Equació 23

Degut a la pols:

$$\frac{1}{2} * \rho_s * (1 - \varepsilon) * V_s^2$$

Equació 24

2.2.3.1.3 Pèrdues de càrrega causades per l'efecte gravitacional.

Sovint, en una instal·lació de transport pneumàtic en la qual s'ha de transportar un producte d'un lloc a l'altre, la instal·lació no està dissenyada exclusivament en un pla horitzontal sinó que, la instal·lació està dissenyada també en un pla vertical. Això comporta que, el producte hagi de superar canonades verticals.

El fet de que hi hagin canonades verticals exposa la mescla transportada a l'efecte de la gravetat. En aquest cas s'hi troben dues variants del mateix efecte, fer pujar una mescla per una canonada, i el contrari, fer baixar una mescla per una canonada. Dintre d'ambdues variants la primera es la més crítica ja que la gravetat està en contra del moviment. En el cas contrari, la gravetat ajuda al moviment de la mescla.

En el cas d'haver de superar una altura, per una banda hi haurà una força elevadora que serà la impulsora del moviment i per l'altre banda, oposant-se al moviment, apart de les citades anteriorment, la gravetat.

Si la força impulsora no es prou gran com per superar la gravetat en aquell punt, la instal·lació entrarà en bloqueig.

Mètode 1 (Pèrdues de càrrega per gravetat)

$$\rho_m * \delta * g$$

Equació 25

Com en els altres casos, sense excepció, es possible trobar una metodologia de càlcul d'aquestes mateixes pèrdues de càrrega més detallada (mètode 2). Aquestes pèrdues de càrrega poden dividir-se en les degudes a l'aire i a la pols. Com es pot preveure, la força que ha de fer el sistema motriu per a vèncer la gravetat en la pols no serà el mateix que en l'aire, bàsicament degut a la diferències de densitats.

Cal destacar que només s'analitzaran aquestes pèrdues de càrrega en els trams on l'eix de la canonada difereixi del pla horitzontal.

Mètode 2 (Pèrdues de càrrega per gravetat)

Degut a l'aire:

$$\rho * g * \varepsilon * L_v * \sin\theta$$

Equació 26

Degut a la pols:

$$\rho_s * g * (1 - \varepsilon) * L_v * \sin\theta$$

Equació 27

La suma dels resultats de les equacions 26 i 27 donarà les pèrdues de càrrega totals per gravetat en la instal·lació.

2.2.3.2 Pèrdues de càrrega secundàries.

2.2.3.2.1 Pèrdues de càrrega degudes als canvis de direcció (Colzes).

A l'hora de dissenyar una instal·lació en la qual es transporta un producte d'un lloc a un altre amb l'ajuda d'aire a pressió hi ha un requisit bàsic i fonamental que es, el de fer el transport el més directe i senzill possible. Per tant, evitar línies innecessàries que puguin desencadenar en cavitacions, obturacions...

Una vegada introduïda la importància del disseny de la línia en un transport, es inevitable l'ús de colzes en el transport per tant, la minimització d'ells comportarà en un transport molt més previsible.

Un colze es un component que desvia el fluid de la direcció establerta per la canonada. Per tant, el colze es un element utilitzat en el transport pneumàtic per salvar diferents elements que barren el pas de la canonada.

A diferència de gasoductes (transport de gas a pressió per canonades), el transport pneumàtic de materials pulverulents implica el fet de tenir sòlids a una certa velocitat en contacte amb les parets interiors de la canonada. En una canonada recte les col·lisions que poden arribar a tenir la pols amb les parets son mínimes ja que, la direcció del fluid i la canonada son paral·leles.

Per contra, en un colze, el material pulverulent es obligat a canviar la seva direcció de cop, cosa que, implica una zona de col·lisions molt elevada i per tant, una pèrdua de càrrega elevada.

En funció del sistema de transport que es desitgi i s'implanti, aquestes pèrdues de càrrega seran menors o majors.

En un sistema de transport pneumàtic en fase diluïda la velocitat de la mescla es molt elevada, els canvis de direcció creen notables pèrdues de càrrega però, les altes velocitats asseguren un risc baix d'obturbació de les canonades. Al tenir una tant elevada velocitat de transport els colzes son parts de la instal·lació que pateixen molt desgast. Per tant, cal tenir en compte que, en fase diluïda els colzes han de protegir-se i aplicar un manteniment periòdic.

Per contra, en un sistema de transport pneumàtic en fase densa la velocitat de la mescla es inferior i per tant, les pèrdues de càrrega son menors però, aquestes baixes velocitats de transport creen més risc d'obturbació a les canonades.

Al haver-hi una velocitat inferior els colzes no pateixen tant el desgast com a la fase diluïda.

Anteriorment, es considerava que la curvatura dels colzes havia de ser suau per evitar grans pèrdues de càrrega, no obstant, s'ha provat que l'ús de T's en un tram cec (veure figura 2) allarga el temps de vida útil de la instal·lació. A la part cega es forma un petit coixí de partícules que amortitzen els cops contra la canonada.

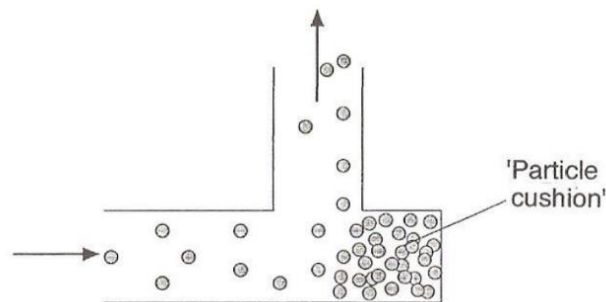


Figura 6: T cega

Per calcular les pèrdues de càrrega causades per els canvis de direcció de les canonades es tenen el mètode 1 i el mètode 2.

A continuació es descriuen les dues opcions respectivament.

En molts dels càlculs per a instal·lacions de transport pneumàtic existeix una correlació entre les pèrdues de càrrega causades per els canvis de direcció i les causades per les pèrdues de càrrega en una canonada vertical.

Mètode 2 (Pèrdues de càrrega per canvis de direcció)

Més concretament:

$$1 \text{ corba } 90^\circ = 7,5 \text{ metres de canonada vertical}$$

Equació 28

Per tant, a l'hora de dissenyar una instal·lació es farà la línia isomètrica, es farà un càlcul dels canvis de direcció que hi ha en tota la instal·lació i, es farà la conversió citada anteriorment.

Per contra, hi ha metodologies analítiques que relacionen els canvis de direcció amb la velocitat mitja de la mescla.

Mètode 1 (Pèrdues de càrrega per canvis de direcció)

$$\lambda_3 * V_m * \varphi * k$$

Equació 29

En funció del radi de curvatura del colze i el diàmetre interior de la canonada tindrem un coeficient λ_3 diferent.

2.2.3.2.2 Accessoris

Finalment, es possible que en una instal·lació faci falta refinar, barrejar, tractar el producte transportat.

Qualsevol acció que no tingui a veure amb el transport comportarà una pèrdua de càrrega afegida. Un exemple clar d'aquest efecte es el d'un filtre.

La utilització de filtres en el transport pneumàtic ja sigui per separar diferents granulometries o per separar pols de l'aire utilitzat en el transport a l'atmosfera, comporta unes pèrdues de càrrega que poden afectar a la pèrdua de càrrega total d'una instal·lació.

A continuació es desenvolupen els accessoris més rellevants a l'hora de estimar les pèrdues de càrrega d'un sistema de transport pneumàtic. Per ordre de rellevància hi hauria: Filtres, Vàlvules, Desviadores...

L'avaluació analítica de les pèrdues de càrrega d'aquests elements avui en dia segueix en desenvolupament ja que, no es fàcil trobar analíticament una expressió que relacioni els paràmetres bàsics del transport pneumàtic amb aquests accessoris.

En l'annex 1 del treball s'exposa un resum per la correcta comprensió de la metodologia de càlcul de les pèrdues de càrrega per una instal·lació de transport pneumàtic.

Una vegada definit el producte (anàlisi granulomètric i anàlisi reològic), es tingui definit els límits cinètics (anàlisi cinètic) i s'hagin acotat les pèrdues de càrrega totals de la instal·lació (anàlisi de les pèrdues de càrrega), es pot definir l'element motriu de la instal·lació de transport pneumàtic.

En l'apartat anterior s'ha trobat les pèrdues de càrrega totals ΔP . Aquest valor no es més que la diferència entre la pressió d'entrada i de sortida de la instal·lació.

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad \text{Equació 30}$$

Si es treballa en impulsio, la pressió final de la canonada es pot suposar com a pressió atmosfèrica i doncs, la pressió a la entrada serà superior.

No obstant, en el cas de treballar en buit, la pressió inicial es pot suposar com a pressió atmosfèrica i, la pressió de sortida serà una pressió inferior a aquesta.

La pressió mitja de la instal·lació ve determinada per la següent formula:

$$P_m = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad \text{Equació 31}$$

D'aquesta forma, la relació aire/pols varia també a la entrada, sortida del transport i la relació aire/pols mitja en tota la instal·lació:

$$\rho_m = \frac{\varphi}{1,2 * V_r} \quad \text{Equació 32}$$

Relació aire/pols a la entrada:

$$\rho_1 = \rho_m * \frac{P_1}{P_m} \quad \text{Equació 33}$$

Relació aire/pols a la sortida:

$$\rho_2 = \rho_m * \frac{P_2}{P_m} \quad \text{Equació 34}$$

Finalment, també es pot saber la velocitat inicial i final de la mescla en la instal·lació.

$$V_1 = \frac{\varphi}{\rho_1} \quad \text{Equació 35}$$

$$V_2 = \frac{\varphi}{\rho_2} \quad \text{Equació 36}$$

La potència consumida per l'element motriu de la instal·lació, ja sigui un compressor com un ventilador o un bufador, ve determinada per:

$$\dot{W} = \frac{\Delta P * \frac{\pi * D^2}{4} * V_1}{10^3} \quad \text{Equació 37}$$

El caudal d'aire lliure que ha de proporcionar és el següent:

$$\dot{V} = \frac{\pi * D^2}{4} * V_2 * 60 \quad \text{Equació 38}$$

Tant com per fer front a sobrepressions puntuals a la instal·lació, com per assegurar un caudal continu d'aire lliure, s'ha d'afegir un marge de seguretat als valors calculats amb anterioritat.

De manera que, les característiques finals del compressor seran:

Pressió total a vèncer:

$$P_{sortida} \cong 1,1 * \Delta P \quad \text{Equació 39}$$

Caudal d'aire lliure a entregar:

$$\dot{V}_{caudal} \cong 1,15 * \dot{V} \quad \text{Equació 40}$$

2.3 APLICACIÓ DEL MÈTODE DE CÀLCUL

Una vegada realitzat un mètode analític basat en la recerca de informació, es important fer la aplicació en un cas real per constatar la coherència d'aquest mètode o pel contrari, la incoherència d'aquest mètode.

Abans de començar amb el material pulverulent es de vital importància conèixer les condicions atmosfèriques que rodegen la instal·lació. En aquest cas es suposen els següents valors:

CONDICIONS ATMOSFÈRIQUES

Densitat de l'aire: $1,29 \frac{Kg}{m^3}$

Viscositat de l'aire: $1,84 * 10^{-5} Pa * s$

Gravetat: $9,8 \frac{Kg}{m^2 * s}$

Pressió atmosfèrica: $101293 Pa$

Temperatura: $22 ^\circ C$

Seguint el mètode analític, el següent pas es conèixer les propietats físiques i químiques del producte a transportar i per això, el primer de tot es la realització d'un anàlisi del producte.

ANÀLISI DEL PRODUCTE

Producte a transportar: Gransa de Polipropilè (PP)

Naturalesa del producte: Sòlid granulat cilíndric

Densitat de la partícula: $900 \frac{Kg}{m^3}$

Densitat aparent: $450 - 550 \frac{Kg}{m^3}$

(Per al càlcul de la instal·lació es prendrà la més restrictiva, la inferior)

Dimensions de la partícula:

- Diàmetre de la partícula: $3 - 4mm$
- Longitud de la partícula: $2,5 - 3mm$

(Hipòtesi: Dimensió de partícula esfèrica: $\bar{x} = 0,003m$)

Angle de repòs: 30°

Característiques del producte:

- Sec
- Grup B a la classificació de Geldart (Dimensió de gra mig, bona retenció d'aire)
- Bona fluïdesa ($10 < FFC < \infty$)
- Tendeix a carregar-se electro-estàticament

Una vegada conegudes les característiques principals del producte a transportar es important definir la instal·lació per la qual es transportarà aquest material. Es per això que, amb la aprovació d'una empresa del sector, s'han utilitzat uns plànols d'una nau industrial (ANNEX 2: Plànol nau industrial) en la qual aquesta mateixa empresa pretén instal·lar un petit banc de probes per calcular diferents aspectes importants en el transport pneumàtic. Per tant, el lay-out realitzat de la instal·lació s'adequa als requeriments especificats per l'empresa (ANNEX 2: Layout de la instal·lació).

Una vegada realitzat el Lay-out de la instal·lació, es important determinar el límit de fluïdització, les velocitats de ruptura i bloqueig en la canonada així com la distribució de velocitats en la canonada. El següent pas es la realització d'un anàlisi cinètic.

ANÀLISI CINÈTIC

Superfície interior de la canonada: $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,1016^2}{4} = 0,0081m^2$

Velocitat màssica: $2000 \frac{Kg}{h} \cong 0,5 \frac{Kg}{s}$

Índex de transport(φ): $\varphi = \frac{M_s}{A} = \frac{0,5 \frac{Kg}{s}}{0,0081} = 68,53 \frac{Kg}{m^2 \cdot s}$

Aplicant la correlació de Rizk, equació 7, es troba la velocitat de ruptura per aquest cas:

$$\frac{0,5}{1,29 * V_r * 0,0081} = \left(\frac{1}{10^{(1440 * 0,003 + 1,96)}} \right) * \left(\frac{V_r}{\sqrt{9,8 * 0,1016}} \right)^{(1100 * 0,003 + 2,5)}$$

$$V_r = 15,01 \text{ m/s}$$

Amb la velocitat de ruptura es possible i l'índex de transport es possible calcular la densitat de mescla aproximada en el transport amb l'equació 33:

$$\rho_m = \frac{68,53}{1,2 * 15,01} = 3,80 \text{ Kg/m}^3$$

Aplicant l'equació 8 es troba la velocitat superficial del gas:

$$V_o = 1,5 * 15,01 \text{ m/s}$$

$$V_o = 22,52 \text{ m/s}$$

Una vegada definida la velocitat superficial del gas es possible trobar la velocitat dels sòlids en suspensió, equació 9.

$$V_s = 22,52 * (1 - 0,0638 * 0,003^{0,3} * 450^{0,5})$$

$$V_s = 17,19 \text{ m/s}$$

Amb la velocitat del material pulverulent es possible trobar el càlcul de la porositat interior de la canonada, equació 4:

$$\varepsilon = 1 - \frac{0,5}{0,0081 * 450 * 17,19}$$

$$\varepsilon = 0,9911$$

Amb la porositat de la canonada es possible trobar la velocitat real del gas, equació 10:

$$V_g = \frac{22,52}{0,9911}$$

$$V_g = 22,72 \text{ m/s}$$

Amb les velocitats reals del gas i del material en pols, es troba la velocitat de lliscament entre elles, equació 11:

$$V_{slip} = 22,72 \text{ m/s} - 17,19 \text{ m/s}$$

$$V_{slip} = 5,53 \text{ m/s}$$

Una vegada resoltes totes les velocitats del sistema s'està en disposició de calcular les pèrdues de càrrega del sistema.

PÈRDUES DE CÀRREGA

En aquest apartat es necessària la comparació amb altres productes semblants a aquest. A la taula 4 es poden apreciar per a diferents materials en pols, les seves característiques i coeficients experimentals per el càlcul de les pèrdues de càrrega.

Tenint com a referència la densitat aparent de la gransa de polipropilè, $450 - 550 \text{ Kg/m}^3$, el producte que més se li assembla es la terra de batan, densitat mínima 560 Kg/m^3 , producte amb una densitat i característiques de transport semblants.

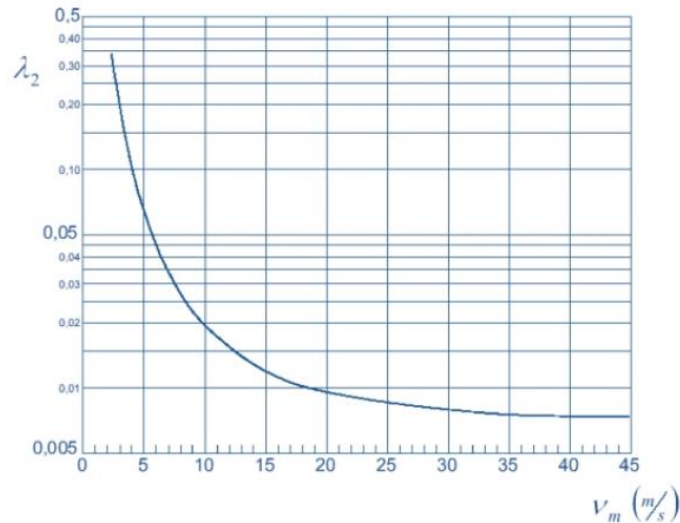
Material	$\rho(\text{kg/m}^3)$	Malla	Tamaño partícula (μm)	v_{\min} (m/s)	ε_{\max} (kg/m^3)	λ_1
Alúmina	930	150	104	7,5	96	1,25
Barita	1.340 ÷ 2.160	240	64	7,5	160	1,25 ÷ 1,5
Bauxita molida	1440	150	104	7,5	128	1,25
Bentonita	770 ÷ 1050	200	74	7,5	64	1 ÷ 1,25
Carbón en polvo	720	200	74	4,5	112	1
Cemento	1.050 ÷ 1.440	170	92	7,5	160	1 ÷ 1,25
Ceniza en polvo	720	100	140	4,5	160	1,25
Ceniza sódica	560	150	104	9	80	1
Ceniza sódica	1.050	85	170	12	48	1,25
Dióxido de uranio	3.500	200	74	18	160	1,5
Fluorita	1.760	200	74	9	160	1,25
Fosfato mineral	1.280	100	140	9	112	1,25
Harina	560	100	140	4,5	80	1
Magnesita	1.600	200	74	9	160	1,25
Perborato de sodio	865	85	170	9	48	1
Cloruro sódico (seco)	1.360	100	140	9	80	1,25
Sílice	800 ÷ 960	150	104	6	80	1
Sulfato de sodio	1.280 ÷ 1.440	150	104	12	80	1,25
Tierra de Batán	560 ÷ 880	150	104	6	80	1

Taula 3: Característiques bàsiques de transport pneumàtic d'alguns dels materials pulverulents més coneguts⁹.

A.Pérez Manso. Cálculo básico de una instalación de transporte neumático de sólidos (2010)

Com es pot apreciar a la taula 3, el coeficient experimental degut a la acceleració de la mescla seria $\lambda_1 = 1$.

Continuant, la següent gràfica relaciona el coeficient de fricció λ_2 amb la velocitat de la mescla, que pot aproximar-se com la velocitat del gas.



Gràfic 4: Coeficient experimental degut a la fricció en vers la velocitat de la mescla.
Font: ANEXO II. Memoria de dimensionado de sistemas de transporte de materia. Proyecto de planta de producción de mortero ignífugo (2009).

Per una velocitat de mescla de 22,72 m/s es pot aproximar un coeficient experimental de fricció de 0,008.

Finalment, en funció del radi de curvatura, el coeficient experimental per a les pèrdues de càrrega en colzes bé donat per la següent taula:

Relació Radi de curvatura / Ø Tubería	λ_3
2	1,5
4	0,75
6 o més	0,5

Taula 4: Factor de fregament per colzes en funció del radi de curvatura i el diàmetre de la canonada.
Font: E.E.U.A. Nuevos manuales técnicos labor (1949). Transporte neumático de materiales pulverulentos.

Com en aquesta instal·lació es faran servir colzes amb radi de curvatura 10 vegades superiors al diàmetre de la canonada, el valor del coeficient experimental λ_3 es 0,5.

Per al correcte anàlisi de les pèrdues de càrrega, seria imprescindible la realització prèvia d'un anàlisi de la gransa de polipropilè per a determinar els coeficients experimentals propis d'aquest producte que anteriorment es desenvolupen, en aquest cas s'aproximen amb materials semblants al estudiat.

Una vegada definits els coeficients experimentals del sistema, es pot avançar amb el càlcul de les pèrdues de càrrega.

1. Pèrdues de càrrega per fricció

1.1 Mètode 1

Aplicant l'equació 12:

$$0,008 * 22,72 * 68,53 * \left(\frac{71}{0,1016} \right) = \mathbf{8696,22 \text{ Pa}}$$

1.2 Mètode 2

Les pèrdues de càrrega es separen en canonada horitzontal, vertical, pols i aire.

En primer lloc, s'han de resoldre mitjançant les equacions 15 i 19, els números de Reynolds per l'aire i per la pols.

Per l'aire:

$$Re = \frac{22,72 * 1,29 * 0,1016}{1,84 * 10^{-5}}$$

$$Re = 161835,55$$

Per la pols:

$$Re' = \frac{5,53 * 1,29 * 0,003}{1,84 * 10^{-5}}$$

$$Re' = 1163,10$$

Amb l'equació 18 es calcula el coeficient d'arrossegament:

$$C_D = \frac{12}{1163,10} * (1 + 0,15 * 1163,10^{0,687})$$

$$C_D = 0,20789$$

Una vegada calculats el número de Reynolds del gas, de la pols, i el coeficient d'arrossegament, es poden calcular: el coeficient de fricció del gas (equació 14), el coeficient de fricció de sòlids per conductes horitzontals (equació 17) i el coeficient de fricció de sòlids per conductes verticals (equació 22), respectivament:

$$f_g = 2 * (0,0396 * 161835,55^{-0,25})$$

$$f_g = 0,00368$$

$$f_{s,H} = \frac{6}{8} * \frac{1,29}{450} * 0,20789 * \frac{0,1016}{0,003} * \left(\frac{5,53}{17,19}\right)^2$$

$$f_{s,H} = 0,00156$$

$$f_{s,V} = \frac{0,057}{2} * \frac{0,1016}{17,19} * \sqrt{\frac{9,8}{0,1016}}$$

$$f_{s,V} = 0,00165$$

1.2.1 Pèrdues de càrrega en canonada horitzontal

1.2.1.1 Degut a l'aire (equació 13):

$$2 * 0,00368 * 1,29 * 22,72^2 * \frac{56}{0,1016} * 0,9911 = \mathbf{2677,29 Pa}$$

1.2.1.2 Degut a la pols (equació 16):

$$2 * 0,00156 * 450 * 17,19^2 * \frac{56}{0,1016} * (1 - 0,9911) = \mathbf{2035,18 Pa}$$

1.2.2 Pèrdues de càrrega en canonada vertical

1.2.2.1 Degut a l'aire (equació 20):

$$2 * 0,00368 * 1,29 * 22,72^2 * \frac{15}{0,1016} * 0,9911 = \mathbf{717,13 Pa}$$

1.2.2.2 Degut a la pols (equació 21):

$$2 * 0,00165 * 450 * 17,19^2 * \frac{15}{0,1016} * (1 - 0,9911) = \mathbf{576,59 Pa}$$

La suma d'aquestes últimes quatre pèrdues de càrrega donen com a resultat, les pèrdues de càrrega totals per fricció en la instal·lació

$$2677,29 Pa + 2035,18 Pa + 717,13 Pa + 576,59 Pa = \mathbf{6006,19 Pa}$$

2. Pèrdues de càrrega per acceleració de la mescla:

2.1 Mètode 1

Aplicant l'equació 23:

$$1 * 22,72 * 68,53 = \mathbf{1557 \text{ Pa}}$$

2.2 Mètode 2

2.2.1 Degut a l'aire (equació 24):

$$\frac{1}{2} * 1,29 * 0,9911 * 22,72^2 = \mathbf{329,98 \text{ Pa}}$$

2.2.2 Degut a la pols (equació 25):

$$\frac{1}{2} * 450 * (1 - 0,9911) * 17,19^2 = \mathbf{591,73 \text{ Pa}}$$

La suma de les pèrdues de càrrega degudes a l'aire i a la pols en la zona d'acceleració de la mescla:

$$329,98 \text{ Pa} + 591,73 \text{ Pa} = \mathbf{921,71 \text{ Pa}}$$

3. Pèrdues de càrrega per efectes gravitacionals

Aquestes pèrdues de càrrega es divideixen en dos trams (Tram I i Tram II)

3.1 Mètode 1, Tram I

Aplicant l'equació 26:

$$3,80 * 10 * 9,8 = \mathbf{372,4 \text{ Pa}}$$

3.2 Mètode 2, Tram I $\theta = 90^\circ$

3.2.1 Degut a l'aire (equació 27):

$$1,29 * 9,8 * 0,9911 * 10 * 1 = \mathbf{125,29 \text{ Pa}}$$

3.2.2 Degut a la pols (equació 28):

$$450 * 9,8 * (1 - 0,9911) * 10 * 1 = \mathbf{392,49 \text{ Pa}}$$

La suma d'aquestes dues últimes pèrdues de càrrega dona les pèrdues de càrrega en el tram I.

$$125,29 \text{ Pa} + 392,49 \text{ Pa} = \mathbf{517,78 \text{ Pa}}$$

3.3 Mètode 1, Tram II

Aplicant l'equació 26:

$$3,80 * 5 * 9,8 = \mathbf{186,20 Pa}$$

3.3 Mètode 2, Tram II $\theta = 60^\circ$

3.3.1 Degut a l'aire (equació 27):

$$1,29 * 9,8 * 0,9911 * 5 * \sin(60) = \mathbf{54,25 Pa}$$

3.3.2 Degut a la pols (equació 28):

$$450 * 9,8 * (1 - 0,9911) * 5 * \sin(60) = \mathbf{169,95 Pa}$$

La suma d'aquestes dues últimes pèrdues de càrrega dona les pèrdues de càrrega en el tram II.

$$54,25 Pa + 169,95 Pa = \mathbf{224,2 Pa}$$

4. Pèrdues de càrrega en colzes

4.1 Mètode 1

Aplicant l'equació 30:

$$0,5 * 22,72 * 68,53 * 10 = \mathbf{7785,01 Pa}$$

4.2 Mètode 2

Aplicant l'equació 29:

$$1 \text{ corba } 90^\circ = 7,5 \text{ metres de canonada vertical}$$

$$10 \text{ corba } 90^\circ = 75 \text{ metres de canonada vertical}$$

S'aplica un altre vegada les pèrdues de càrrega per fricció i les pèrdues de càrrega per gravetat.

4.2.1 Pèrdues de càrrega per fricció en canonada vertical

4.2.1.1 Degut a l'aire (equació 20):

$$2 * 0,00368 * 1,29 * 22,72^2 * \frac{75}{0,1016} * 0,9911 = \mathbf{3585,66 Pa}$$

4.2.1.2 Degut a la pols (equació 21):

$$2 * 0,00165 * 450 * 17,19^2 * \frac{75}{0,1016} * (1 - 0,9911) = \mathbf{2882,94 Pa}$$

La suma d'aquestes pèrdues de càrrega donen com a resultat, les pèrdues de càrrega totals equivalents a les pèrdues de càrrega en els colzes.

$$3585,66 Pa + 2882,94 Pa = \mathbf{6468,6 Pa}$$

4.2.2 Pèrdues de càrrega per gravetat

4.2.2.1 Degut a l'aire (equació 27):

$$1,29 * 9,8 * 0,9911 * 75 * \sin(90) = \mathbf{939,71 Pa}$$

4.2.2.2 Degut a la pols (equació 28):

$$450 * 9,8 * (1 - 0,9911) * 75 * \sin(90) = \mathbf{2943,68 \text{ Pa}}$$

La suma d'aquestes dues últimes pèrdues de càrrega dona les pèrdues de càrrega en el tram I.

$$939,71 \text{ Pa} + 2943,68 \text{ Pa} = \mathbf{3883,39 \text{ Pa}}$$

Finalment es possible calcula les pèrdues de càrrega equivalents a 10 colzes sumant el valor anterior amb les pèrdues de càrrega per fricció.

$$3883,39 \text{ Pa} + 6468,6 \text{ Pa} = \mathbf{10351,99 \text{ Pa}}$$

Pel Mètode 1, les pèrdues de càrrega totals en la instal·lació son:

$$8696,22 \text{ Pa} + 1557 \text{ Pa} + 372,40 \text{ Pa} + 186,20 \text{ Pa} + 7785,01 \text{ Pa} = \mathbf{18596,83 \text{ Pa}}$$

Pel Mètode 2, les pèrdues de càrrega totals en la instal·lació son:

$$6006,19 \text{ Pa} + 921,71 \text{ Pa} + 517,78 \text{ Pa} + 224,2 \text{ Pa} + 10351,99 \text{ Pa} = \mathbf{18021,87 \text{ Pa}}$$

Per tal de millorar la comprensió de la part numèrica del treball, s'adjunta l'annex 1 pàgina 4, juntament amb la memòria del treball, on s'hi pot apreciar un resum dels resultats dels dos mètodes de càlcul.

Amb uns valors tant semblants, es pot afirmar que els dos mètodes es poden prendre com vàlids per al dimensionament d'un equip de transport pneumàtic.

Per continuar amb el dimensionament del compressor es prendran les dades més restrictives entre les dues anteriorment citades. Per tant, la pèrdua de càrrega total es de 18596,83 Pa.

A continuació es determinen a la entrada i a la sortida del transport les condicions de pressió, relació aire/pols i velocitat de la mescla.

Per un sistema en fase diluïda per impulsíó, hi ha una pressió superior a la atmosfèrica en el principi de la línia i, es pren com a hipòtesi, pressió atmosfèrica al final de la línia. Per tant, aplicant l'equació 31:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

Sabent que la pressió al final de la línia es la atmosfèrica, $P_2 = 101293 \text{ Pa}$, la pressió al principi de la línia es la següent:

$$P_1 = 101293 \text{ Pa} + 18596,83 \text{ Pa} = 119889,83 \text{ Pa}$$

Amb la pressió a l'inici i al final de la línia de transport es calcula una estimació de la pressió mitja en el sistema mitjançant l'equació 32:

$$P_m = \frac{119889,83 \text{ Pa} + 101293}{2} = 110591,42 \text{ Pa}$$

A la entrada (subíndex 1), la relació aire/pols i la velocitat de la mescla venen determinades per les equacions 34 i 36 respectivament:

$$\rho_1 = 3,80 * \frac{119889,83 \text{ Pa}}{110591,42 \text{ Pa}}$$

$$\rho_1 = 4,12 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_1 = \frac{68,53}{4,12}$$

$$V_1 = 16,63 \text{ m/s}$$

A la sortida (subíndex 2), la relació aire/pols i la velocitat de la mescla venen determinades per les equacions 35 i 37 respectivament:

$$\rho_2 = 3,80 * \frac{101293 \text{ Pa}}{110591,42 \text{ Pa}}$$

$$\rho_2 = 3,48 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_2 = \frac{68,53}{3,48}$$

$$V_2 = 19,69 \text{ m/s}$$

La potència consumida per l'element motriu de la instal·lació, ja sigui un compressor com un ventilador o un bufador, ve determinada per l'equació 38:

$$\dot{W} = \frac{18596,83 * \frac{\pi * 0,1016^2}{4} * 16,63}{10^3}$$

$$\dot{W} = 2,51 \text{ KW}$$

El caudal d'aire lliure que ha de proporcionar aquest element motriu ve determinat per l'equació 39:

$$\dot{V} = \frac{\pi * 0,1016^2}{4} * 19,69 * 60$$

$$\dot{V} = 9,58 \text{ m}^3/\text{min} \cong 574,8 \text{ m}^3/\text{h} \cong 0,159 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tant com per fer front a sobrepressions puntuals a la instal·lació, com per assegurar un caudal continu d'aire lliure, s'ha d'afegir un marge de seguretat als valors calculats amb anterioritat. De manera que, les característiques finals del compressor seran les següents.

Pressió total a vèncer, equació 40:

$$P_{sortida} \cong 1,1 * 18596,83 \text{ Pa}$$

$$P_{sortida} \cong 20.456,513 \text{ Pa}$$

Caudal d'aire lliure a entregar, equació 41:

$$\dot{V}_{caudal} \cong 1,15 * 9,58 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\dot{V}_{caudal} \cong 11,02 \text{ m}^3/\text{min} \cong 661,2 \text{ m}^3/\text{h} \cong 0,183 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.4 PROPULSORS DE GAS

En una instal·lació de transport pneumàtic el més important de tot es l'element impulsor del gas, en aquest cas aire. Els equips per al transport de gas en general poden denominar-se com a ventiladors/bufadors. Un ventilador es una turbomàquina que es caracteritza perquè impulsa un gas (fluid compressible) al que li transfereix una potència amb un determinat rendiment.

A pesar de no existir ningun conveni universal, els ventiladors poden subdividir-se en quatre grans grups:

- Ventiladors de baixa pressió: Fins una pressió de l'ordre de 200mm columna d'aigua, a aquests se'ls coneix com a ventiladors estàndards.
- Ventiladors de mitja pressió: Entre 200mm i 800mm columna d'aigua, a aquests se'ls hi anomena bufadors.
- Ventiladors d'alta pressió: Entre 800 i 2500mm columna d'aigua, a aquests se'ls coneix com turbo-bufadores.
- Ventiladors de molt alta pressió: Per sobre de 2500mm columna d'aigua, aquests son utilitzats sobretot en aplicacions de transport en fase densa. Aquests se'ls hi anomena turbocompressors.

A continuació es reflexa una taula amb les categories dels ventiladors en funció de les pèrdues de càrrega que suporten.

Tipus de ventilador	Pèrdues de càrrega (mm CDA)	Pèrdues de càrrega (mbar)	Pèrdues de càrrega (Pa)
VENTILADOR CONVENCIONAL	≤ 200	≤ 20	≤ 2026
BUFADOR	$200 \leq x \leq 800$	$20 \leq x \leq 80$	$2026 \leq x \leq 8103$
TURBO-BUFADOR	$800 \leq x \leq 2500$	$80 \leq x \leq 250$	$8103 \leq x \leq 25323$
TURBO-COMPRESSOR	≥ 2500	≥ 250	≥ 25323

Taula 3: Classificació dels ventiladors en funció de les pèrdues de càrrega.
Font: E.E.U.A. Nuevos manuales técnicos labor (1949). Transporte neumático de materiales pulverulentos.

En funció de la trajectòria del fluid, els ventiladors es poden classificar en 3 (veure figura 7):

- Ventiladors de flux radial (centrífugs).
- Ventiladors de flux semi-axial (helicó-centrífugs).
- Ventiladors de flux axial.

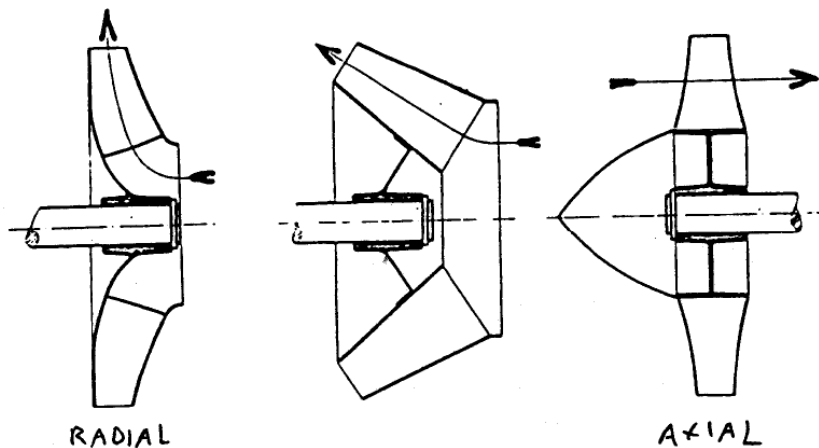


Figura 7: Classificació dels diferents rodets existents per a ventiladors.
Font: Rhodes (2003).

2.4.1 Ventiladors radials (centrífugs)

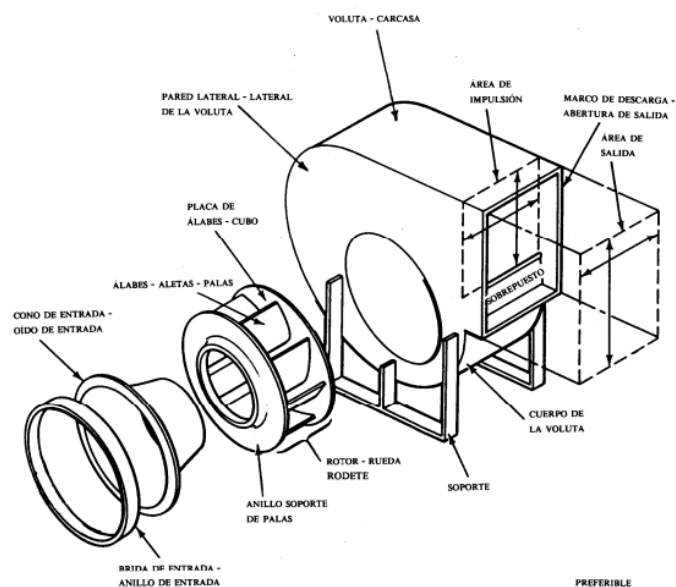


Figura 8: Vista explotada d'un ventilador radial centrífug d'àleps inclinats enrere¹⁰.
Font: Rhodes (2003).

En els ventiladors centrífugs la trajectòria del fluid segueix la direcció de l'eix del rodet a la entrada i el fluid surt accelerat en direcció perpendicular a la anteriorment citada (veure figura 4). Aquest tipus de ventiladors tenen tres tipus bàsics de rodets:

- a) Àleps corbats cap endavant
- b) Àleps rectes o radials
- c) Àleps inclinats cap enrere/Corbats cap enrere

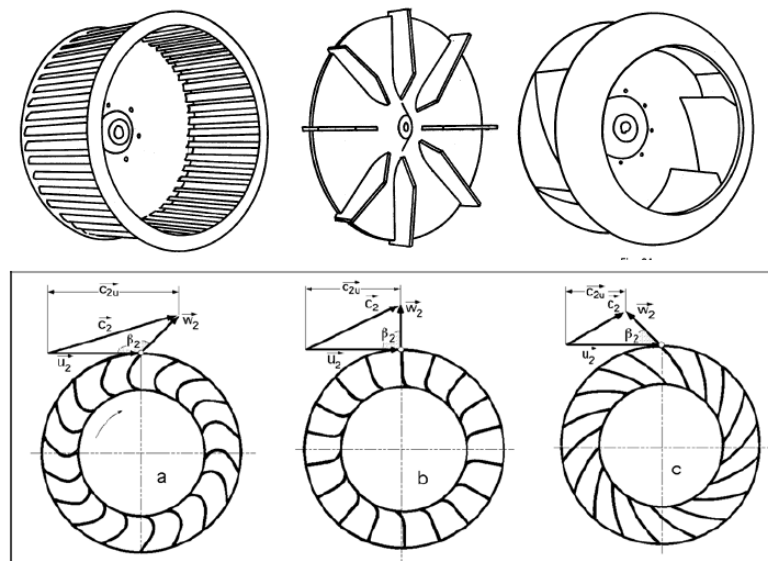
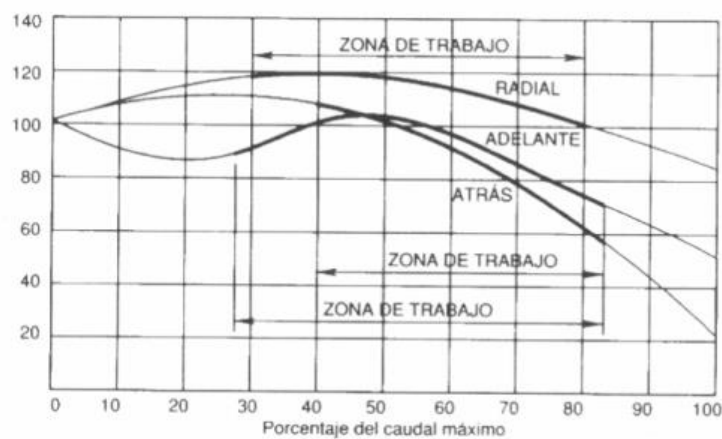


Figura 9: Ventiladors centrífugs de a) àleps corbats endavant, b) àleps rectes, c) àleps corbats enrere, amb les seves corresponents distribucions de velocitat. Font: Rhodes (2003).



Gràfic 5: Corbes característiques dels ventiladors centrífugs¹¹.

Els ventiladors d'àleps corbats cap endavant (també anomenats de gàbia d'esquirol) tenen una hèlix o rodet amb els àleps corbats en el mateix sentit que la direcció de gir. Aquests ventiladors necessiten poc espai, baixa velocitat esfèrica i son silenciosos. S'utilitzen quan es té una baixa o mitja pressió estàtica dins la instal·lació, aquest tipus de ventiladors tenen un ús molt freqüent en els sistemes de calefacció, aire condicionat, renovació d'aire, etc.

Els ventiladors centrífugs radials o d'àleps rectes tenen el rodet amb els àleps disposats en forma radial. La disposició radial dels àleps evita la acumulació dels materials sobre la mateixa. Aquest tipus de ventilador és utilitzat freqüentment en les instal·lacions en las que l'aire contaminat amb partícules ha de circular pel ventilador. En aquest tipus de ventiladors la velocitat perifèrica es mitja i s'utilitza en molts sistemes d'extracció localitzada.

Els ventiladors centrífugs d'àleps corbats enrere tenen un rodet amb àleps inclinats en sentit contrari al de rotació. Aquest tipus de ventilador es el de major velocitat perifèrica i major rendiment amb un nivell sonor relativament baix.

2.4.2 Ventiladors axials

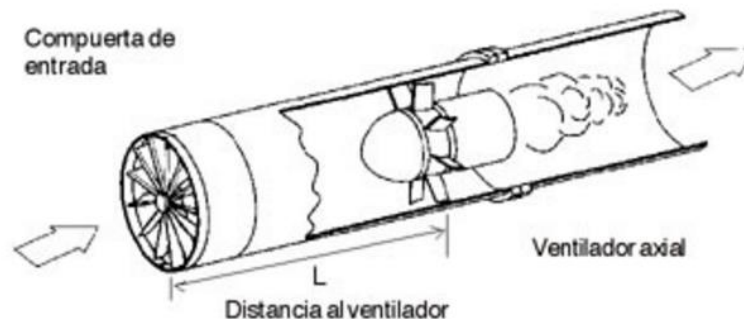


Figura 10: Ventilador axial.
Font: Rhodes (2003).

En els ventiladors axials la trajectòria del fluid segueix la direcció de l'eix de la canonada a la entrada i el fluid surt accelerat en aquella mateixa direcció (veure figura 10). Hi ha tres tipus de ventiladors axials.

- a) Helicoïdals
- b) Tubulars
- c) Tubulars amb directriu

Els ventiladors helicoïdals es fan servir per moure el fluid amb poca pèrdua de càrrega, la seva aplicació més comú es la ventilació general. Aquestes es construeixen amb dos tipus d'àleps:

- Àleps de disc, per ventiladors sense conducte.
- Àleps estretes, per ventiladors que han de vèncer resistències inferiors a 25mm columna d'aigua.

Les seves prestacions estan molt influenciades per la resistència al flux de l'aire i un petit increment de la pressió provoca una reducció important del caudal.

Els ventiladors tubulars contenen un hèlix d'àleps estrets de secció constant o amb perfil aerodinàmic (ala portant) muntada en una carcassa cilíndrica. Aquest tipus de ventilador pot arribar a vèncer pèrdues de càrrega moderades de l'ordre dels 50mm columna d'aigua.

Les directrius o comportes, son elements del ventilador que tenen la missió de fer desaparèixer la rotació existent o adquirida per el ventilador a l'hora d'accelerar el fluid. Aquestes directrius poden col·locar-se a la entrada o a la sortida del ventilador (veure figura 11).

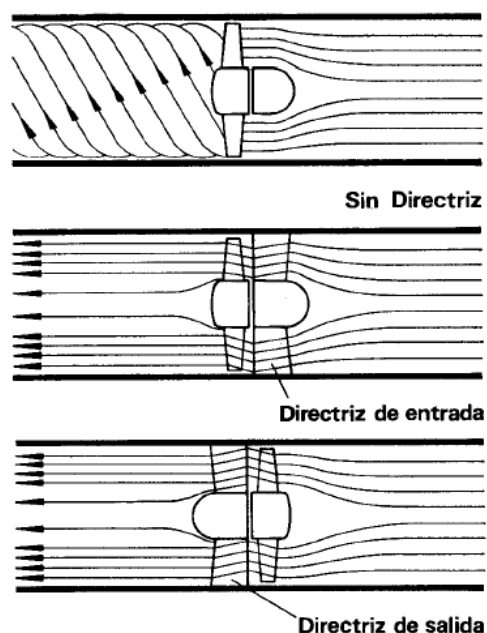


Figura 11: Efecte de les directrius o comportes sobre les línies de corrent a entrada i sortida del rodet axial. Font: Rhodes (2003).

Existeix el ventilador que mescla les dues tecnologies citades anteriorment, el ventilador centrífug de flux axial (veure figura 8).

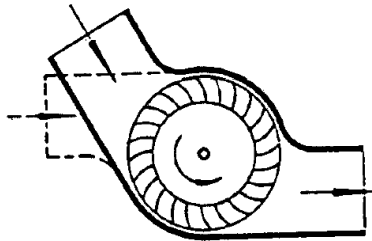


Figura 12: Ventilador centrífug flux axial.
Font: Rhodes (2003).

Finalment, existeix un altre tecnologia per a impulsar l'aire de subministrament a la instal·lació.

2.4.3 Bufador del tipus "Roots"

A la figura 13 es representa un bufador amb aquesta tecnologia, consta de dos rotors que giren en sentit contrari i produeixen un flux de gas perpendicular als eixos dels rotors.

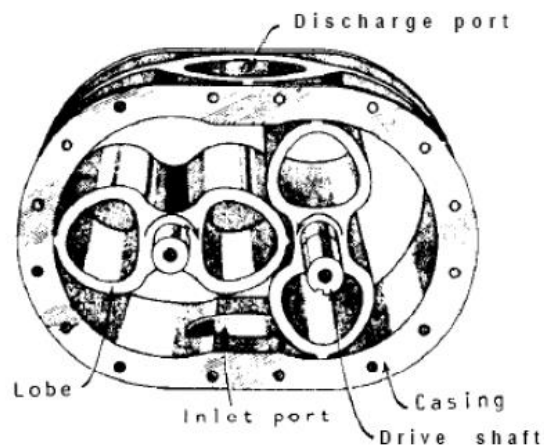
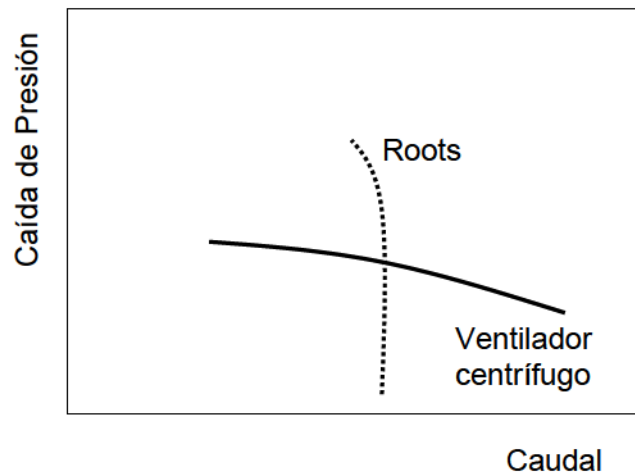


Figura 13: Bufador del tipus "Root".
Font: Rhodes (2003).

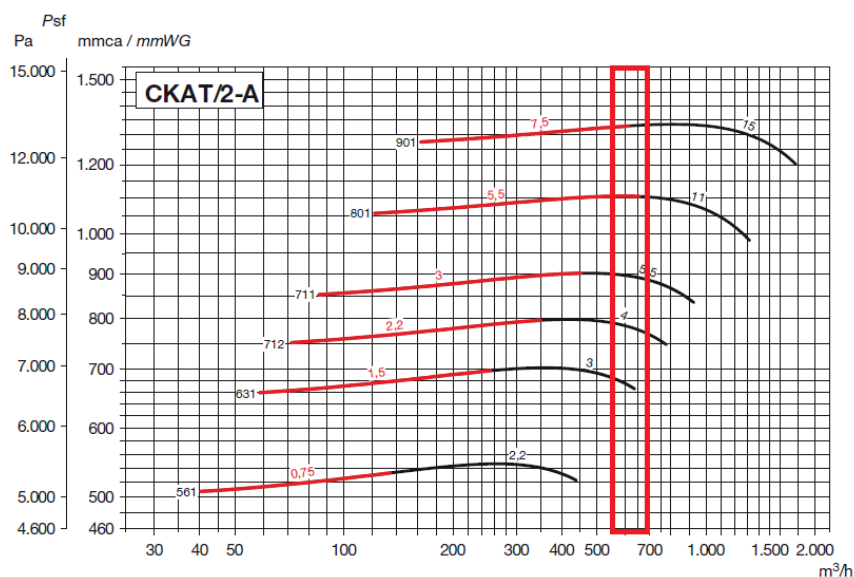
Al gràfic es veu la comparativa entre el propulsor de tipus “Roots” i un ventilador centrífug, com es pot apreciar, aquesta tecnologia pot vèncer pressions mes elevades però fent un dimensionament molt acurat del caudal de treball perquè, si no es treballa en el punt òptim de treball el rendiment del equip cau en picat. En canvi, un ventilador centrífug no arriba a vèncer tanta pressió però per contra, el seu rendiment allunyant-se del punt òptim de treball no cau tan dràsticament.



Gràfic 6: Comparació Ventilador centrífug i Bufadors del tipus “Roots”.
Font: Rhodes (2003).

Per aquesta instal·lació en concret, tenint el volum d'aire mínim ($570 \text{ m}^3/\text{min}$) i màxim ($700 \text{ m}^3/\text{min}$) a proporcionar, i la pèrdua de càrrega a vèncer ($20.456,513 \text{ Pa}$), es pot dimensionar el equip en funció de les solucions que proveïdors de propulsors de gas com “Soler&Palau” o “Sodeca” ofereixen o tenen en el mercat. A continuació, es valoraran alternatives que aquestes dues marques han ofert per el dimensionament d'una instal·lació pilot.

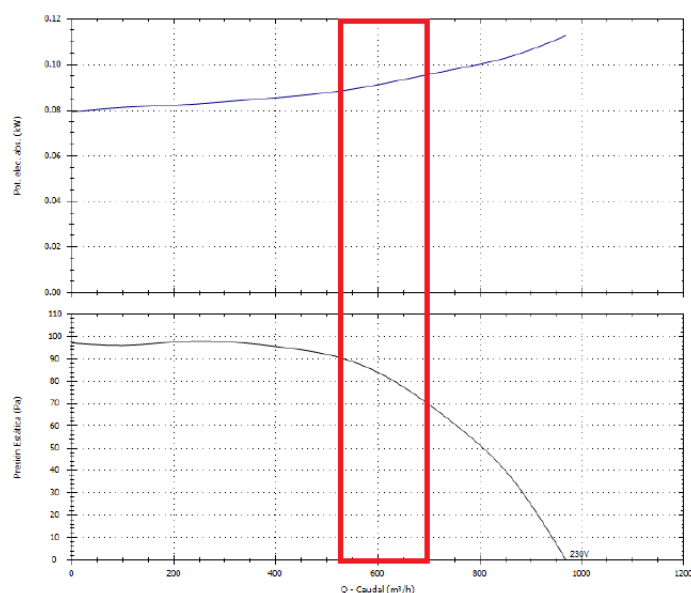
Per ordre, Soler & Palau. Dintre dels propulsors de gas d'aquesta empresa, es trien els ventiladors centrífugs de mitja pressió, i d'entre ells, el model S&P CKAT/2-901 amb les següents corbes característiques de treball:



Gràfic 7: Corbes característiques dels ventiladors centrífugs S&P CKAT/2-901.
(La zona en vermell es la zona de treball de la instal·lació)

Font: (<http://www.solerpalau.es/producto/aplicaciones-industriales.html>) Consultat Maig21, 2016

Dintre del mateix proveïdor s'ha trobat un ventilador centrífug amb característiques molt més cenyides a les especificacions de la instal·lació. Aquest es el model S&P CBM (Versió petita) amb la següent corba característica:

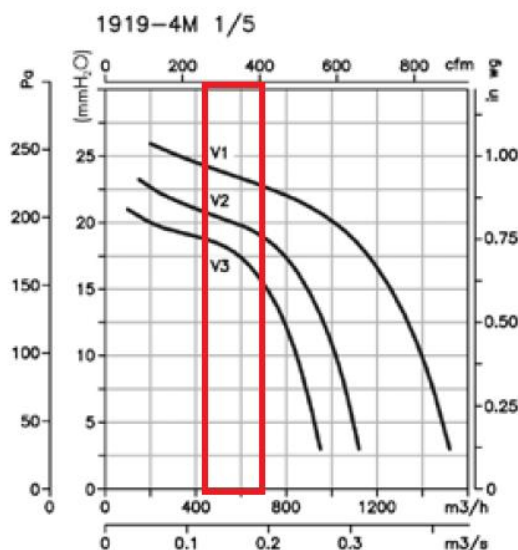


Gràfic 8: Corba característica del ventilador S&P CBM (petit).
(La zona en vermell delimita la zona de treball de la instal·lació)

Font: (<http://www.solerpalau.es/producto/aplicaciones-industriales.html>) Consultat Maig21, 2016

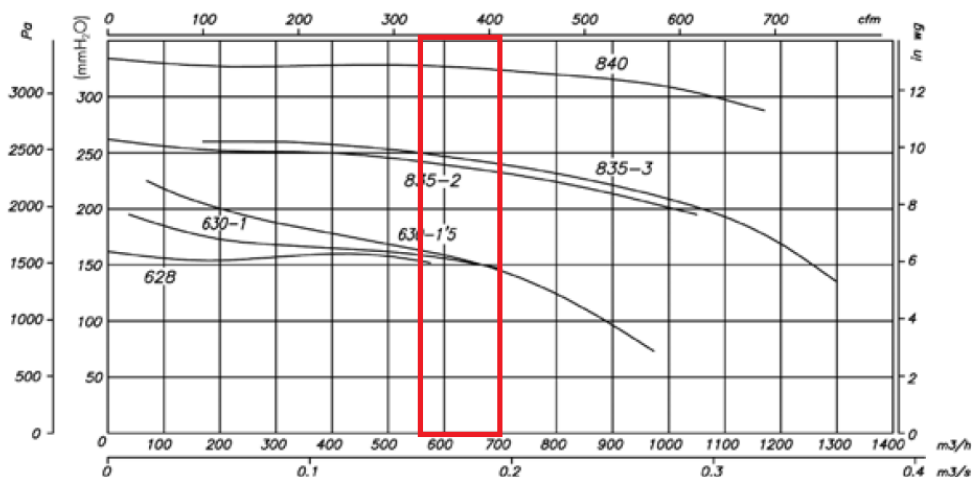
Per poder comparar aquests valors s'ha parlat amb un altre proveïdor de propulsors de gas per aquest tipus de instal·lacions com es "Sodeca".

Dintre d'aquesta empresa s'ha profunditzat en el model CBD i el model CMC respectivament. A continuació s'exposen les corbes característiques del model CBD.



Gràfic 9: Corba característica del ventilador centrífug Sodeca model CBD.
(La zona en vermell delimita el rang d'actuació per aquesta instal·lació en concret).
Font: (<http://www.sodeca.com/productos>) Consultat Maig 22, 2016.

Com es pot apreciar, tant el model V1, com el model V2 i V3, compleixen les especificacions requerides per la instal·lació. Finalment, el model CMC:



Gràfic 10: Corba característica del ventilador centrífug Sodeca model CMC.
(La zona en vermell delimita el rang d'actuació per aquesta instal·lació en concret).
Font: (<http://www.sodeca.com/productos>) Consultat Maig 22, 2016

Com es pot apreciar en el gràfic 10, el model 628 CMC no compliria amb el volum d'aire requerit per el transport pneumàtic de material en pols en aquesta instal·lació per contra, tots els altres si que ho fan.

Per concloure amb els propulsors de gas, qualsevol dels models a dalt detallats servirien perfectament per a dur a terme el transport. I per tant, el següent pas i últim per la adquisició de l'equip seria una comparació econòmica (aquest apartat no es tractarà en aquest projecte).



Figura 4: Ventiladors centrífugs Soler & Palau (Models CBM (Petit) i CKAT/2-901, respectivament).
(<http://www.solerpalau.es/producto/aplicaciones-industriales.html>) Consultat Maig 21, 2016

CMC

CBD

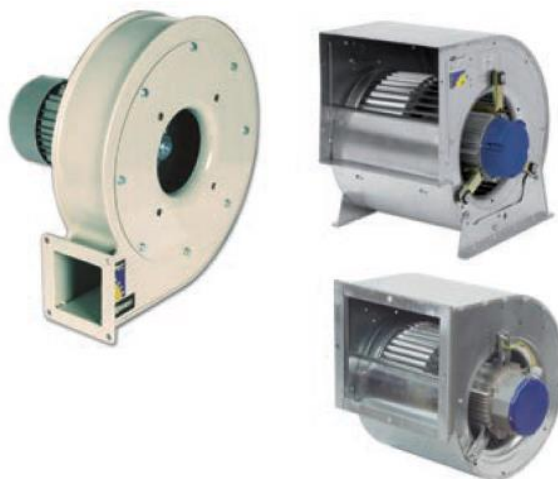


Figura 5: Ventiladors centrífugs Sodeca.

Font: (<http://www.sodeca.com/productos>) Consultat Maig 22, 2016

2.5 SEPARADORS AIRE/PRODUCTE

Una vegada transportat un producte en pols des de un punt fins a un altre amb l'ajuda d'un aire a pressió o depressió, aquest aire de transport s'ha d'evacuar d'alguna manera. Depenent del producte, l'aire no es pot extreure directament amb una xemeneia a l'atmosfera al final del recorregut sinó que, per tal d'evacuar l'aire lliure de producte en pols i, recollir el màxim de producte en el punt de descàrrega es comú la utilització d'un o més separadors aire/producte.

En aquest apartat hi apareixen diferents tecnologies de separació de pols i aire que depenen en gran part de les característiques del producte en pols, el principi d'operació d'aquests equips pot fundar-se en l'assentament per gravitació, en la col·lisió, la centrifugació, la filtració, el rentat, la precipitació electro-estàtica o en la combinació d'aquests mètodes.

Els separadors (col·lectors) es divideixen en dos grans grups: Els col·lectors primaris i els col·lectors secundaris.

2.5.1 Separadors aire/producte primaris

Utilitzen el assentament per gravitació, la col·lisió, la centrifugació. Separen el producte de l'aire però, gran part dels materials pulverulents produeixen polsim. Aquesta polsim es degut a molts factors, un d'ells i primordial a tenir en compte és, la velocitat del producte. Al haver-hi una velocitat alta del producte les partícules de pols impacten entre elles i amb les parets interiors de la canonada i creant polsim. Aquest polsim de dimensions ínfimes es tractat en la segona fase, els col·lectors secundaris que, utilitzen la filtració, el rentat i la precipitació electro-estàtica com a tecnologies bàsiques.

En el primer dels casos, es pot subdividir els col·lectors primaris en els més utilitzats:

- Tremuges de retenció
- Col·lectors de xoc
- Ciclons

Les tremuges de retenció poden utilitzar-se com a col·lectors primaris, encara que, no deixen de ser una sitja on, la mescla aire/pols es abocada per la part superior, ja sigui verticalment com tangencialment i, per gravetat, el producte tendeix a assentar-se a la part inferior, l'aire en aquest cas s'escapa per la part superior de

l'equip. Per pols amb altes densitats i amb partícules de grans dimensions de gra, l'assentament pot ser pràcticament complet i no seria necessària la utilització d'un col·lector secundari.

Els col·lectors de xoc utilitzen els canvis de direcció, en aquest cas deflectors, per separar les partícules amb grans dimensions de gra, que cauen per efectes de gravetat i separar-les de la corrent d'aire. Aquest tipus de col·lectors no acostumen a instal·lar-se sense un col·lector secundari a continuació.

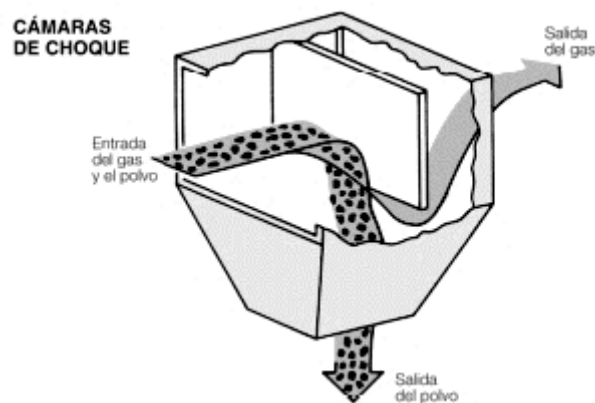


Figura 6: Col·lector de xoc.

Font: (<http://www.soler-palau.mx/casosaplicacion5.php>) Consultat Maig 15, 2016

Els ciclons són els separadors aire/producte per antonomàsia, utilitzats universalment en milers d'instal·lacions. Aquest separador utilitza com a fonament la rotació de la corrent d'aire la qual, degut a les forces centrífugues, llança les partícules contra la paret de l'equip, relliscant posteriorment cap a la descàrrega. Aquest moviment rotatiu es produeix generalment, dirigint tangencialment la corrent d'aire a l'interior de l'equip, aquest equip té forma cònica en la majoria dels casos encara que, existeixen equips cilíndrics. Per l'extrem superior s'escapa l'aire i per l'extrem inferior el producte.

D'entre els ciclons hi existeixen de moltes formes, diferents tipologies per a diferents treballs e instal·lacions. Aquests poden dividir-se en: Ciclons senzills o simples, ciclons de gran eficiència, ciclons de gran caudal i multi-ciclons.

Els ciclons senzills o simples, tenen forma cònica i poden tenir un rang ampli de proporcions. Tots efectuen una separació completa de pols, des de pols amb dimensions ínfimes fins a granulars utilitzant petites caigudes de pressió (fins un màxim de $0,00253 \text{ Kg/cm}^2$). Deuen estar previstos ja sigui de tremuges de retenció per la pols recollida (per evitar interferències amb el flux d'aire) o d'una vàlvula de descàrrega de pols.

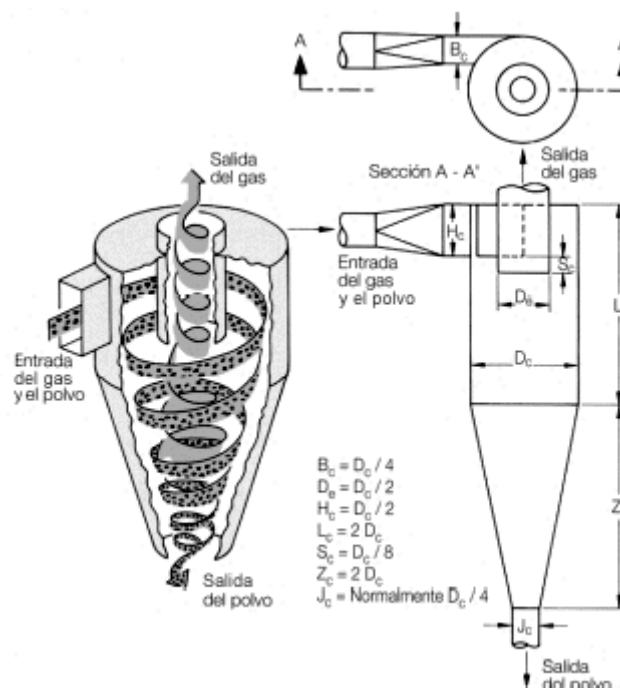


Figura 7: Cicló simple.

Font: (<http://www.soler-palau.mx/casosaplicacion5.php>) Consultat Maig 15, 2016

En els ciclons de gran eficiència, les dimensions disten molt d'un cicló simple. En primer lloc, la altura d'aquest equip es més elevada amb un diàmetre superior al metre. Això provoca una major superfície per què el producte rellisqui i pugui ser descarregat per gravetat. Al ser un equip de dimensions tant grans però, les pèrdues de càrrega associades a la separació d'aire i producte també son elevades, oscil·lant entre $0,0101 \text{ Kg/cm}^2$ i $0,0125 \text{ Kg/cm}^2$.

Quan s'utilitza un cicló de gran eficiència, per poder captar el màxim de pols fina possible es aconsella separar les fraccions de producte granular de les fines al començament del cicló. Això es possible instal·lant al cicló separador un conducte en espiral o un deflector per a conduir la pols en gra de dalt a baix. Amb aquest conducte, s'aconsegueix conduir les partícules granulars i alliberar superfície lliscant per a productes amb dimensions més petites, l'espiral augmenta el rendiment del cicló en comparació amb un de senzill.

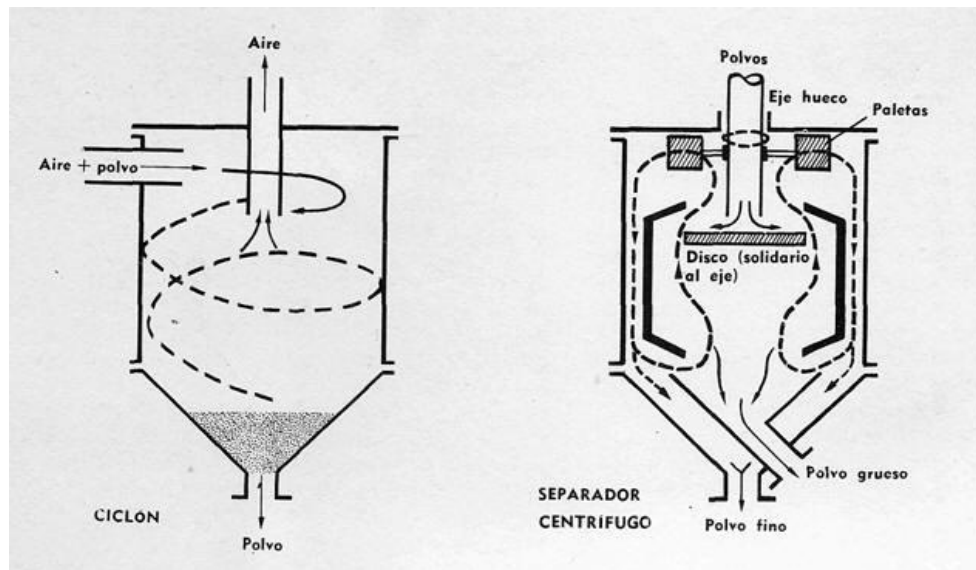


Figura 8: Comparació de cicló simple amb el cicló de gran eficiència.

Font: (<http://historiaybiografias.com/centrifugacion/>) Consultat Maig 7, 2016

Els ciclons de gran caudal no deixen de ser ciclons de gran eficiència en els quals se'ls dimensiona per unes més ajustades pèrdues de càrrega amb una eficiència molt alta de filtratge.

Per a sistemes de ventilació o, en sistemes on es transporta molt aire amb pols molt diluïda, es pot aplicar un multi-cicló.

Un multi-cicló utilitza la tecnologia ja explicada d'un cicló simple en bateria amb altres ciclons de reduïdes dimensions juntament amb un deflector per a separar la pols fina del material granulat (veure figura 19).

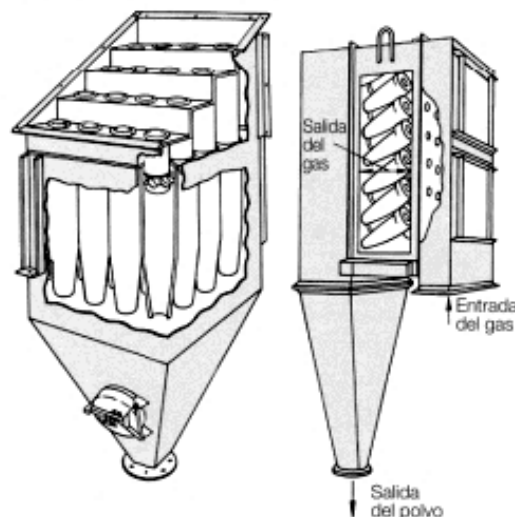


Figura 9: Multi-cicló.

Font: (<http://www.soler-palau.mx/casosaplicacion5.php>) Consultat Maig 15, 2016

2.5.2 Separadors aire/producte secundaris

D'entre els més importants i utilitzats es ressalten els següents:

- Mànigues filtrants
- Filtres amb medi porós
- Rentadores i col·lectors de parets humides
- Precipitació electro-estàtica

Les mànigues filtrants¹² utilitzen una superfície de tela, generalment en forma de sac, exposada a una corrent d'aire amb producte amb la finalitat de, separar el producte de l'aire. L'aire passaria a través de la tela i el producte quedaria enganxat creant una pel·lícula a sobre de la màniga la qual faria augmentar la eficiència d'aquesta última fins a uns valors propers al 100% de captació.

Degut a l'acumulació de pols a les mànigues filtrants, aquestes han de netejar-se periòdicament. Les mànigues poden netejar-se totes juntes, per seccions, manualment o utilitzant una entrada d'aire a contracorrent creant una ona d'urto¹³ a l'interior.

Funcionament d'un filtre de mànigues

Els gasos carregats de pols arriben a través de l'entrada d'aire brut (12) a la càmera de filtració (13). Un deflector (14) provoca la caiguda de la pols granular cap a la part inferior de l'equip (10), alliberant de treball el sistema de filtració e impedit que malbé les mànigues per abrasió directa.

L'aire travessa les mànigues (3) de fora endins i la pols queda retinguda depositada a la part exterior de la mateixa.

Les mànigues es disposen en files (4) cada màniga va muntada sobre una estructura metàl·lica (5). Aquestes estructures metàl·liques a la vegada, van penjades d'una estructura de subjecció de totes les estructures de totes les mànigues (6).

Així, tota la carcassa (1) constitueix una gran càmera bruta (2). La pols va dipositant-se a la part inferior i posteriorment un equip extractor (11) el transporta.

L'aire net travessa les mànigues i surt per el canal d'aire net (17) cap a l'exterior, generalment succionat per un ventilador.

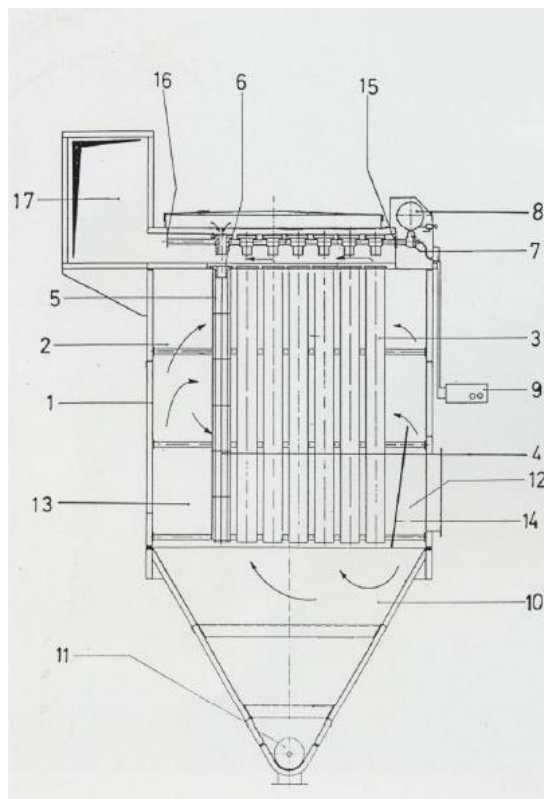


Figura 20: Estructura d'un filtre de mànigues.

Font: (<http://www.fyma.es/cat-productos/filtros-de-mangas>) Consultat Maig 7, 2016

En segon lloc, el filtre de medi porós. Aquesta tecnologia esta basada en la porositat de diferents medis que normalment son polímers, plàstics. L'aire amb pols es conduït travessant uns tubs de plàstic porós que, retenen la pols i deixen circular l'aire exempta de greixos i sobretot el més important exemptes de pols.

Aquest tipus de filtres es poden utilitzar únicament quan la pols per separar està en condicions seques i no contenen partícules inferiors a las del plàstic. Per tenir seguretat del correcte funcionament d'aquest equip es realitza una prova anterior al muntatge per verificar que l'equip acumula o no gradualment partícules en els seus poros, doncs si això succeís, no podrien ser extretes posteriorment.



Figura 21: Filtres de medi porós de diferents formes i dimensions.

Les rentadores i els separadors de parets humides¹⁴ utilitzen aigua, normalment, per separar la pols de l'aire, la pols queda retinguda per l'aigua en forma de fang mentre que l'aire escapa per una sortida a la part superior de l'equip, aquests equips son coneguts per el nom en anglès, "Scrubbers".

Aquests filtres s'utilitzen només per eliminar petites traces de pols que no poden alliberar-se a l'atmosfera i que no es indispensable la recollida en sec.

D'entre els més utilitzats es troben els següents, representats en les següents figures:

Rentador de pols amb estrangulament de Venturi, figura 22:

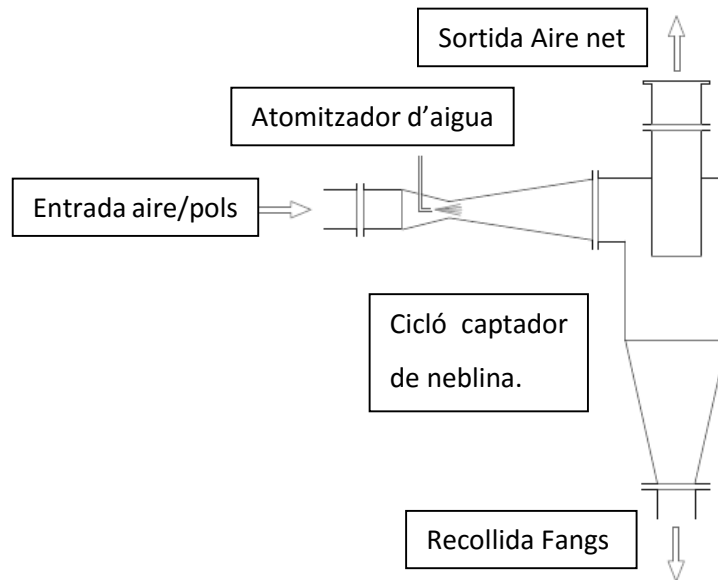


Figura 10: Rentador de pols amb estrangulament de Venturi.

Font: E.E.U.A. Nuevos manuales técnicos labor (1949). Transporte neumatico de materiales pulverulentos.

Requereixen molta potència i molta aigua.

Tambor rentador d'aire, figura 23:

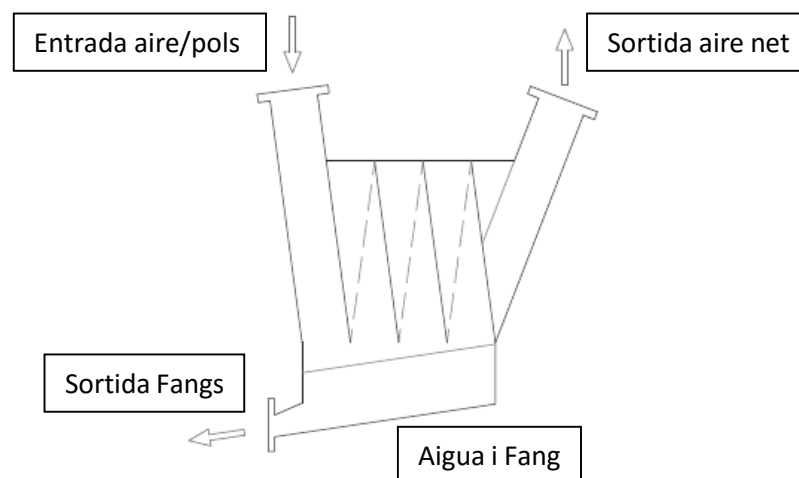


Figura 11: Tambor rentador d'aire.

Font: E.E.U.A. Nuevos manuales técnicos labor (1949). Transporte neumatico de materiales pulverulentos.

Els rentadors s'utilitzen generalment per netejar grans volums d'aire de restes de pols, especialment en els sistemes de captació de pols.

Separador ciclònic de parets humides, figura 24:

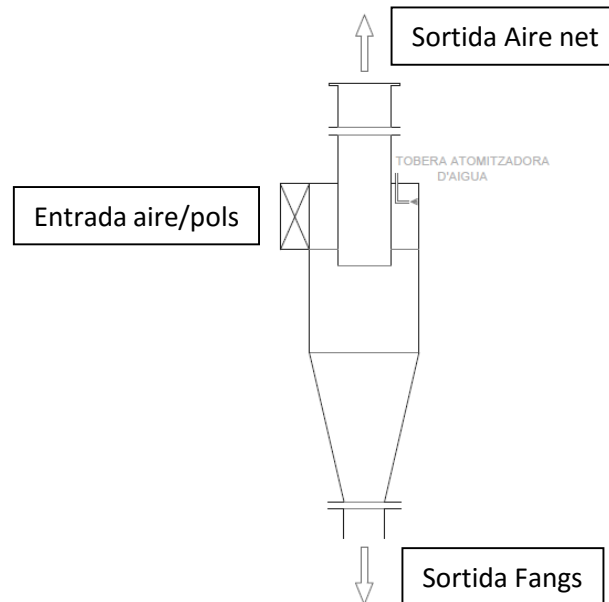


Figura 12: Separador ciclònic de parets humides.

Font: E.E.U.A. Nuevos manuales técnicos labor (1949). Transporte neumatico de materiales pulverulentos.

Finalment, existeixen els equips de precipitació electro-estàtica. Els productes pulverulents al transportar-los per canonades a altes velocitats, es carreguen elèctricament (degut als xocs retenen càrrega electro-estàtica).

Els precipitadors electro-estàtics utilitzen la força d'un camp magnètic per captar aquesta pols carregada positivament i poder-la separar de l'aire. Una vegada captada la pols es transportada per un conducte apart. Aquesta tecnologia requereix una inversió important de diners alhora que, es essencial un estudi previ del producte a transportar ja que, el bobinat i el camp magnètic a aplicar variarà en funció del material en pols a transportar i la instal·lació.

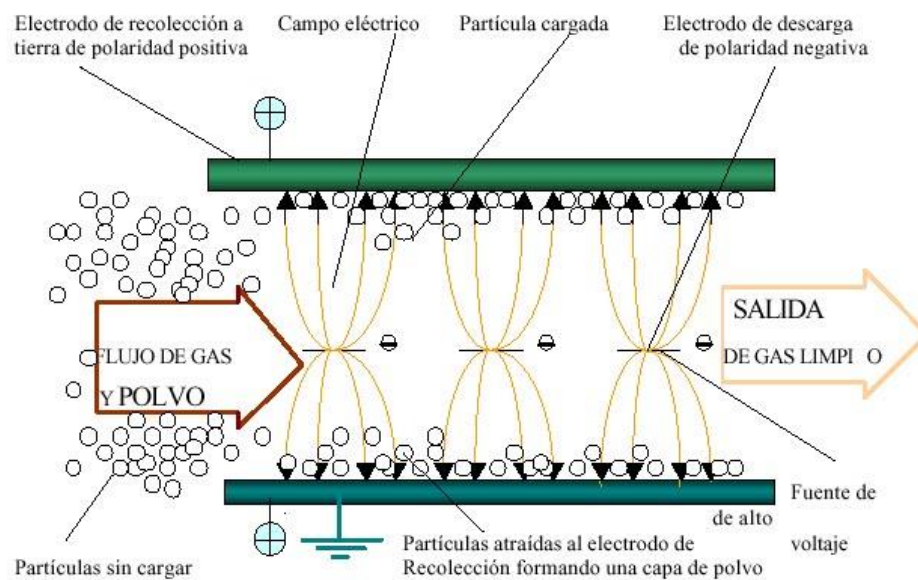


Figura 13: Principi de funcionament de la separació aire/producte mitjançant un camp elèctric¹⁵.

2.6 DOSIFICADORS DE PRODUCTE EN POLS

Per poder proporcionar una entrada constant i regular de producte en pols des de la sitja d'emmagatzematge fins a l'entrada d'aire propulsor, es necessària la instal·lació d'un dosificador de producte. Al mercat hi existeixen diferents opcions per dosificar aquest producte en pols. D'entre els més utilitzats estan: les vàlvules rotatives, els extractors de fons pla, i els extractors de fons vibrant.

2.6.1 Vàlvula Rotativa

Una vàlvula rotativa o alveolar¹⁶ consisteix en un rotor amb cavitats (alvèols) que gira a l'interior d'una carcassa cilíndrica, la qual permet el flux continu del producte a través d'ella conservant les condicions dels equips presents a la part superior e inferior de la vàlvula rotativa. Segons la aplicació i el producte a tractar es poden utilitzar rotors amb diferents tipus de cavitats i diferents velocitats de gir. Disponibles en un ampli ventall de dimensions i poden ser subministrades en acer al carbó o acer inoxidable, segons la necessitat del procés (temperatura, pressió, abrasió del producte, atmosfera explosiva...).

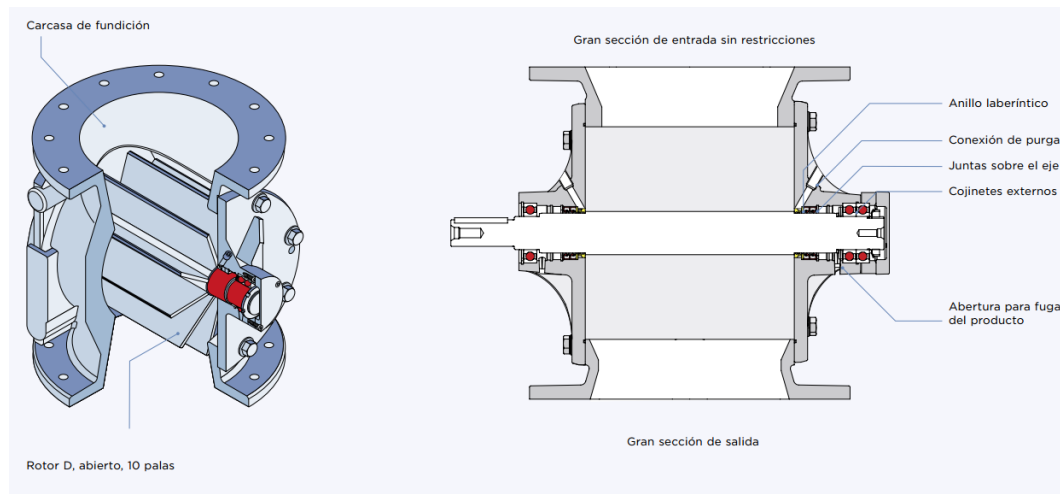


Figura 14: Vàlvula Rotativa¹⁷.

2.6.2 Extractor de fons pla

Un extractor de fons pla¹⁸ es un equip situat a la part inferior del dipòsit preparat per rebre productes amb un baix grau de lliscament i de difícil extracció, facilitant el transport de sòlids de forma contínua. L'extractor de fons pla assegura una elevada velocitat de descàrrega i es presenta com un equip ideal sempre que existeixin problemes d'espai en la instal·lació ja que, comparant-lo amb una vàlvula rotativa, els extractors, ja siguin de fons pla com vibrants, tenen unes dimensions més reduïdes. El sistema utilitza una paleta mòbil que dosifica el producte cap a la descàrrega.

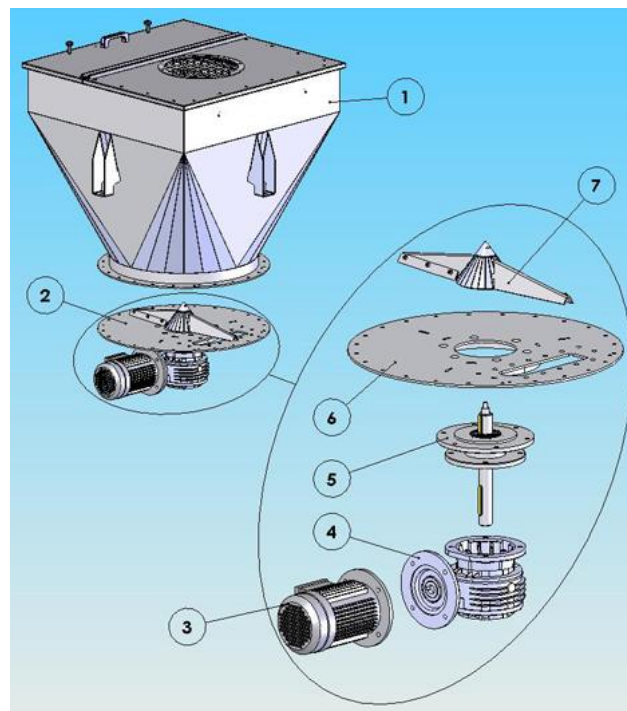


Figura 15: Extractor de fons pla (vista explotada).

1. Tolva
2. Extractor de fons pla
3. Motor elèctric
4. Reductor d'eixos ortogonals
5. Grup transmissor del moviment
6. Fons pla
7. Paleta rotor amb fulles regulables

Font: (<http://www.gimatengineering.com/es/agitadoresconfondoplano.html>) Consultat
Maig 24, 2016

2.6.2 Extractor Vibrant

Finalment, l'extractor vibrant¹⁸ que utilitza la vibració per dosificar el producte, amb unes dimensions semblants a les d'un extractor de fons pla es un dosificador utilitzat en instal·lacions amb poc espai de maniobra i, per a pols amb un grau de lliscament baix. Es transmeten vibracions cap al producte assegurant així, la absència de ponts de col·lapse a l'interior de la tremuja. Aquest sistema aconsegueix un flux de producte continu i regular, evitant així la aparició de fluxos incontrolats i la separació del producte en les seves components principals.

La possibilitat de poder regular la intensitat d'aquestes vibracions fa d'aquest equip, un equip molt versàtil.

A la figura 28 es representen dos sistemes extractors vibrants disponibles.

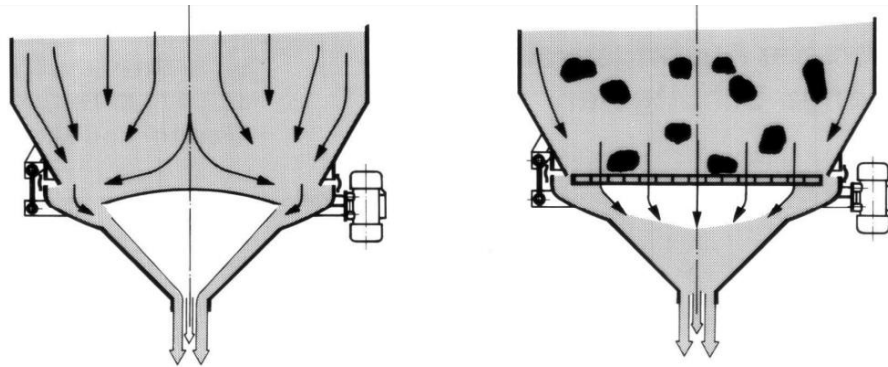


Figura 16: Extractors vibrants¹⁹.

2.7 INSTRUMENTACIÓ

Per al correcte funcionament d'una instal·lació de transport pneumàtic es imperatiu l'ús d'instrumentació. Aquesta instrumentació es utilitzada per mesurar certs aspectes importants a controlar en una instal·lació de transport de material en pols.

La instrumentació bàsica es podria dividir en: Sensors de pressió, sensors de temperatura, sensors de caudal i finalment els sensors de nivell. A continuació s'entrarà en matèria en cadascun d'aquests subgrups.

2.7.1 Sensors de Pressió

En una instal·lació en la qual es treballa amb aire i material en pols, es imprescindible controlar la pressió a l'interior dels equips. Hi ha materials en pols que, a pressions elevades i a una certa temperatura poden crear una guspira i així donar pas a una explosió. Es per això que l'ús de sensors de pressió es imprescindible en aquest tipus d'instal·lacions. Aquests sensors tant poden ser picatges simples en algun punt de la instal·lació crític on s'hagi de mesurar la pressió en aquell punt en concret o per contra, dos punts separats de la instal·lació, aquests equips se'ls coneix com transmissors de pressió diferencial.

Un transmissor de pressió diferencial es un instrument que mesura la pressió de dos punts i mitjançant un programa simple calcula la diferència de pressió entre aquells punts. La utilització d'aquests equips es bàsicament per controlar el procés, si hi hagués una fuita, una canonada obstruïda en el sistema, la diferència de pressió es veuria afectada i donaria una senyal d'alarma. Un altre ús del transmissor de pressió diferencial es per poder donar l'ordre d'actuació de la neteja de les mànigues filtrants d'un filtre de mànigues. El transmissor de pressió diferencial pren la pressió a la zona neta i bruta del filtre, amb el pas del temps hi haurà pols que es quedarà arrelada al teixit de les mànigues, això farà augmentar la diferència de pressió del instrument que, al arribar a un "set-point" marcat anteriorment, el transmissor donarà una senyal de neteja i doncs, ja sigui automàticament com manualment es rentaran les mànigues del filtre.



Figura 17: Manòmetre amb molla tubular amb senyal de sortida elèctrica.
Font: (http://www.wika.es/products_pm_es_es.WIKA) Consultat Maig 25, 2016



Figura 18: Transmissor de pressió diferencial.
Font: (http://www.wika.es/dpt_10_es_es.WIKA?ProductGroup=4848&tabPage=4)
Consultat Maig 25, 2016

2.7.2 Sensors de Temperatura

Com en el cas de la pressió, la temperatura es un aspecte important a controlar. Cada material en pols té propietats totalment diferents tant a nivell granulomètric com reològic, hi ha materials que no poden transportar-se a molt alta temperatura perquè el material en pols podria adherir-se a les parets de la canonada obstruint finalment la canonada per contra, una baixa temperatura de transport tampoc seria apropiat. Es per això que mesurar la temperatura en punts crítics de la instal·lació com pot ser llocs de retenció de producte (sitja) o zones de càrrega i descàrrega es vital.

Dins dels sensors de temperatura existeix una gran varietat de sensors en funció de l'aplicació, per al transport pneumàtic els més característics són els següents: Sensors superficials i sensors de immersió.



Figura 31: Sensor de temperatura superficial.

Font: (http://www.wika.es/products_tm_es_es.WIKA) Consultat Juny 5, 2016



Figura 32: Sensors de temperatura de immersió.

Font: (http://www.wika.es/products_tm_es_es.WIKA) Consultat Juny 5, 2016

2.7.3 Sensors de Cabal

En una instal·lació en la qual es transporta un producte d'una zona de càrrega a una zona de descàrrega, és important el control del cabal que hi circula per cada canonada. Si es té controlat el cabal en tot moment, es té calculat el producte en tot moment.

La gran majoria dels sensors de cabal o cabalímetres utilitzen la relació entre la velocitat en aquell punt i la secció interior d'aquella canonada.

Dintre dels sensors de cabal hi ha un gran ventall, d'entre ells:

Placa d'orifici, brida d'orifici o càmera anular. Aquest sistema es un sistema purament mecànic. En el pas d'una canonada, s'instal·la un d'aquests instruments, sabent la pressió i velocitat a la entrada d'aquest instrument es possible dimensionar l'instrument per tal d'obtenir una pressió i un volum d'aire a la sortida desitjat. A la sortida i a la entrada es mesura la velocitat i doncs, es pot fer el càlcul del cabal.

Aquests sistemes son sistemes molt econòmics i s'utilitzen sobretot per a canonades de diàmetres petits reduint petits volums d'aire ja que, amb un volum d'aire gran, aquests instruments poden crear cavitació i turbulències en l'aire a dames, al haver-hi una restricció del pas d'aire s'origina una gran font de soroll.



Figura 33: Placa d'orifici i brida d'orifici.

Font: (http://www.wika.es/products_fl_es_es.WIKA) Consultat Juny 7, 2016

La tovera Venturi, es basa en l'equació de Bernoulli²⁰ i consisteix en una secció convergent de perfil circular i una canonada cilíndrica. Degut a la seva rigidesa, la tovera resulta més estable en front a temperatures i cabals extrems que la placa orifici.

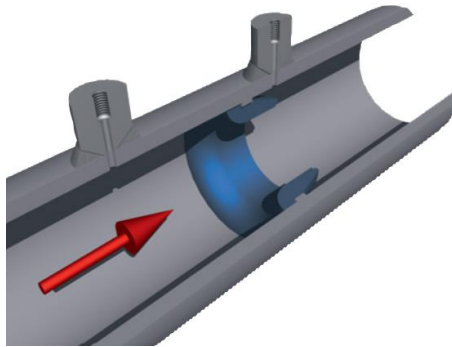


Figura 34: Esquema d'una tovera Venturi.

Font: (http://www.wika.es/products_fl_es_es.WIKA) Consultat Juny 11, 2016



Figura 19: Tovera de Venturi.

Font: (http://www.wika.es/products_fl_es_es.WIKA) Consultat Juny 11, 2016

2.7.4 Sensors de Nivell

Al treballar amb material en pols, s'utilitzen grans equips amb grans velocitats de transport. Per controlar el procés de càrrega i descàrrega es imprescindible la utilització de sensors de nivell ja que, mitjançant ells es pot automatitzar tot el procés en una instal·lació de transport pneumàtic. Si no es tinguessin a l'abast aquests instruments, seria necessari tenir un operari en les zones de càrrega i descàrrega per tal de supervisar el correcte funcionament de la planta.

Dintre dels sensors de nivell hi ha un gran ventall. En funció de la aplicació se'n troben uns o altres:

Sensors de nivell de paleta. D'entre tots els sensors, els de paleta utilitzen una tecnologia purament mecànica. Els sensors de nivell de paleta utilitzen un petit rotor que pot adoptar diferents formes (acostumen a tenir forma de pala o paleta, d'aquí el nom) aquest rotor està connectat a un petit motor que té un funcionament continu. En el moment que el producte arriba al nivell de la pala, el producte impedeix el moviment de l'aspa i aquest dona una senyal d'alarma.

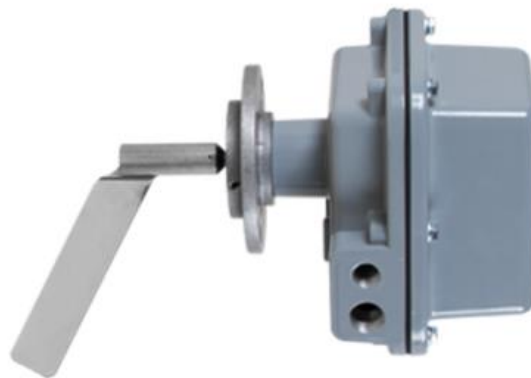


Figura 20: Nivell de sòlids de Paleta.

Font: (http://www.provindus.com.py/Productos_Filsa.html) Consultat Juny 13, 2016

Sensors de nivell vibratori. Aquest tipus de sensors utilitzen la ressonància d'un diapasó que està contínuament en funcionament (vibrant) quan el producte arriba a la posició del nivell la ressonància no es la mateixa i doncs, dona una senyal d'alarma.



Figura 21: Nivell de sòlids Vibratori.

Font: (https://www.vega.com/es-ES/home_es/Productos) Consultat Juny 9, 2016

El sensor capacitiu utilitza una sonda de mesura aïllada en una vareta que estarà a l'interior del dipòsit, en el moment que el producte sobrepassi l'instrument la sonda donarà una senyal d'alarma.



Figura 22: Sensor de sòlids Capacitiu.

Font: (https://www.vega.com/es-ES/home_es/Productos) Consultat Juny 9, 2016

Finalment es utilitza per a instal·lacions amb pressions i temperatures extremes, els sensors de radiació magnètica o ultrasons. Aquests utilitzen un emissor i un receptor enfrontats horitzontalment i el que fan es emetre i rebre ones electromagnètiques o ultrasons. En el moment que el producte sobrepassar l'emissor i el receptor aquesta senyal es talla i doncs, l'instrument dona una senyal d'alarma. Aquesta tecnologia requereix d'una forta inversió econòmica ja que, per contra dels altres, es necessiten dos instruments amb dos lògiques.

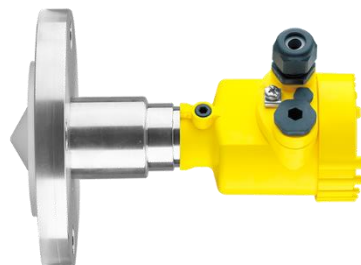


Figura 23: Sensor de sòlids de radiació magnètica.

Font: (https://www.vega.com/es-ES/home_es/Productos) Consultat Juny 9, 2016

3. RESUM DE RESULTATS

3.1 RESUM DEL PRESSUPOST

En aquest apartat s'avalua el cost que ha tingut la realització d'aquest estudi. En primer lloc, convé destacar que s'avalua el cost de l'estudi dut a terme, i els equips que s'implantarien, en cap cas el cost de futurs estudis o continuacions d'aquest ni tampoc es fa un anàlisi econòmic de la viabilitat o la rendibilitat que podria tenir aquesta instal·lació a curt, mig o llarg plaç.

Les parts de la instal·lació que requereixen de materials amb un cost fluctuant al mercat se'ls hi apropia un valor que en el moment de l'estudi es viable però, aquest preu pot canviar si aquests productes fluctuen a l'alça o pel contrari a la baixa en el mercat mundial dels materials.

Dintre del pressupost es poden dividir 2 partides generals: Material i Equips, i preu de instal·lació i posada en marxa (personal). La desglossa d'aquestes partides queda plasmada en el document de pressupost adjunt a aquest.

A continuació es pot apreciar un resum d'aquestes partides:

Equips i materials

Concepte	Total (€)
TOTAL EQUIPS	12.200
TOTAL INSTRUMENTACIÓ	2.915
CANONADES	1.123,85
TOTAL	16.238,85

Taula 4: Pressupost d'Equips i Material.

Personal

Concepte	Número d'operaris	Temps (hores)	Preu per operari ($\frac{\text{€}}{h}$)	Total (€)
Muntatge i posta en marxa dels equips e instruments.	2	40	15	1200
Muntatge i posta en marxa de la part elèctrica i lògica de la instal·lació	2	40	15	1200
TOTAL PERSONAL				2400

Taula 5: Pressupost de personal.

Finalment, el pressupost per dur a terme una instal·lació pilot com la requerida seria la suma dels conceptes a dalt detallats.

PARTIDA	PREU (€)
Equipament i material	16.238,85
Personal	2.400
TOTAL	18.638,85

Taula 6: Pressupost total.

3.2 ANÀLISI I VALORACIÓ DE L'IMPACTE AMBIENTAL

Degut al caràcter bifàsic del transport (Aire/pols) l'impacte ambiental està molt present i vigilat en aquest tipus de instal·lacions. Com queda constant en l'apartat (2.2.1.1 Anàlisi Granulomètric), al treballar amb material en pols i a altes velocitats d'un punt a un altre, s'ha de vigilar que no hi hagin fuites durant el transcurs de la instal·lació, i el més important, en el punt d'extracció de la pols de l'aire i el alliberament d'aquest aire a l'atmosfera es imprescindible assegurar-se que, aquest aire alliberat no conté pols en un % que varia en funció de la localització i el producte transportat.

Per a productes nocius per al cos humà, amb un alt contingut de pols i en zones urbanes, es imprescindible la utilització de separadors aire/producte d'alt rendiment.

Per contra, per a productes amb baix o nul contingut de pols, en zones interurbanes i sense impacte en el cos humà ni el seu entorn, no es imprescindible la utilització de separadors aire producte de tant alt rendiment.

La utilització d'elements de protecció individuals (EPI's) per als operaris que treballen en plantes on s'hi transporta material en pols és, avui en dia, imperatiu.

3.3 PLANIFICACIÓ I PROGRAMACIÓ DEL TREBALL FUTUR PROPOSAT

A la vista dels resultats obtinguts, es considera que caldrà buscar altres metodologies per tal de, seguir ajustant el mètode per a tot tipus de material a transportar en fase diluïda. Quan més delicat sigui un material més informació serà necessària per tal de aconseguir un transport ràpid i amb el menor desgast de les partícules possible.

Una vegada resolta la part analítica del projecte, es passarà a dimensionar tots els equips e instruments de la instal·lació. La utilització de simulacions donarà una idea del comportament del producte a l'interior d'una canonada.

3.4 CONCLUSIONS I RECOMANACIÓ DE CONTINUACIÓ DEL TREBALL

El següent pas en aquest projecte per tant, la continuació del treball, seria la investigació detallada i unitària de cada un dels equips que s'han especificat en el treball. En aquest treball s'ha fet ús de informació general de equips com un bufador o una vàlvula rotativa, seria necessària conèixer més en relació als equips principals (fulla de característiques dels equips: consums elèctrics, nivell sonor, tipus de brida, tipus de rosca, etc.). A continuació, seria necessària una lògica que el procés hauria de seguir, temps de resposta de les vàlvules, temps de resposta dels instruments, per tal de dur a terme aquesta acció serien necessaris uns coneixements d'electricitat i circuits electrònics avançats.

3.5 CONCLUSIONS

En aquest estudi s'ha realitzat primerament un estat d'art en el transport de materials en pols amb aire a pressió (Història, tipus de transports, aplicacions).

Seguidament, s'ha realitzat una metodologia detallada per el càlcul d'una instal·lació de transport pneumàtic, aquest apartat es divideix en l'anàlisi del producte, l'anàlisi cinètic i finalment l'estudi de les pèrdues de càrrega associades al transport. Amb tota aquesta informació es possible dimensionar els equips principals.

Per tal de dimensionar amb sentit els equips principals, s'ha realitzat un repàs de les parts imprescindibles d'una instal·lació d'aquestes característiques (propulsors de gas, separadors aire/producte, dosificadors de producte e instrumentació).

Finalment, amb el mètode analític i la informació dels equips s'ha realitzat un diagrama de procés, el "Lay-out" de la instal·lació i una tria d'equips al mercat que, hipotèticament, s'instal·larien en el cas de dur a terme una instal·lació pilot.

4. SIMBOLOGIA DEL TREBALL

A = Secció interior canonada $[m^2]$

D = Diàmetre interior de canonada $[m]$

C_D = Coeficient d'arrossegament $[adim.]$

f_g = Constant de fregament d'un gas en canonada $[adim.]$

$f_{s,h}$ = Constant de fregament d'un sòlid en canonada horitzontal $[adim.]$

$f_{s,v}$ = Constant de fregament d'un sòlid en canonada vertical $[adim.]$

k = Número de colzes $[adim.]$

g = Gravetat $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ = Densitat del gas $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_s = Densitat del sòlid $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_{abs} = Densitat absoluta $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_{rel} = Densitat relativa $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_1 = Densitat de la mescla al inici del transport pneumàtic $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_2 = Densitat de la mescla al final del transport pneumàtic $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_m = Densitat de la mescla $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

V_g = Velocitat del gas $\left[\frac{m}{s}\right]$

V_s = Velocitat del sòlid $\left[\frac{m}{s}\right]$

$$V_{slip} = \text{Velocitat de lliscament} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_m = \text{Velocitat mitja de la mescla} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_b = \text{Velocitat de bloqueig de la mescla} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_r = \text{Velocitat de ruptura de la mescla o velocitat de "saltació" del producte} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_t = \text{Velocitat terminal d'una única partícula} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_o = \text{Velocitat superficial de disseny del gas impulsor} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Es pren com a hipòtesi, velocitat terminal igual a velocitat de lliscament ("slip velocity").

$$V_1 = \text{Velocitat de la mescla al inici del transport pneumàtic} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_2 = \text{Velocitat de la mescla al final del transport pneumàtic} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\dot{V} = \text{Caudal d'aire lliure proporcionat per l'equip motriu} \left[\frac{m^3}{min} \right]$$

$$\dot{V}_{caudal} = \text{Caudal d'aire lliure amb factor de seguretat aplicat} \left[\frac{m^3}{min} \right]$$

$$L = \text{Distància total de canonada} [m]$$

$$L_h = \text{Distància horitzontal de canonada} [m]$$

$$L_v = \text{Distància vertical de canonada} [m]$$

$$M_s = \text{Velocitat màssica} \left[\frac{Kg}{s} \right]$$

$$m_c = \text{Massa de sòlids compacta} [kg]$$

$$\Delta P = \text{Pèrdues de càrrega total} [Pa]$$

$$P_{sortida} = \text{Pèrdues de càrrega total amb factor de seguretat aplicat} [Pa]$$

P_1 = Pressió al inici del transport pneumàtic [Pa]

P_2 = Pressió al final del transport pneumàtic [Pa]

P_m = Pressió mitjana a la instal·lació [Pa]

W = Pes d'una massa de sòlids compacta [N]

\dot{W} = Potència consumida per l'element bufador de la instal·lació [KW]

\bar{x} = Longitud característica [m]

Re = Número de Reynolds de l'aire [adim.]

Re' = Número de Reynolds del producte en pols [adim.]

ε = Porositat [adim.]

ε_b = Porositat a la canonada a la velocitat de bloqueig [adim.]

μ = Viscositat dinàmica de l'aire [Pa * s]

φ = Índex de transport $\left[\frac{Kg}{m^2 * s} \right]$

$\gamma_{m\grave{a}x}$ = Densitat màxima admissible en canonada $\left[\frac{Kg \text{ pols}}{m^3 \text{ aire}} \right]$

γ_m = Densitat mitja admissible en canonada $\left[\frac{Kg \text{ pols}}{m^3 \text{ aire}} \right]$

δ = Diferència de cotes [m]

\forall_{comp} = Volum ocupat per una massa de sòlids compacta [m^3]

\forall_{rel} = Volum ocupat per una massa de sòlids sense compactar [m^3]

θ = Angle entre la horitzontal del terra i la l'eix de la canonada [$^\circ$]

λ_1 = Constant experimental [adim.]

Es un coeficient que varia segons el disseny dels dispositius d'alimentació de pols i l'acceleració de la mescla, s'ha de trobar experimentalment.

λ_2 = Constant experimental [adim.]

Es un coeficient que depèn de les característiques del producte, de la canonada i de la densitat de la mescla, s'ha de trobar experimentalment.

$$\lambda_3 = \text{Constant experimental [adim.]}$$

Es un coeficient que relaciona el diàmetre interior de la canonada (D) i el radi de curvatura, es troba experimentalment.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Prevenci LA, En DER, Trabajo LOSLDE. ¿Qué hay que saber para evaluar el riesgo?
1. :223-234.
2. Prescott JK, Barnum RA. On Powder Flowability. 2000;(October).
3. Linder HJ. Una recapitulación de soluciones acreditadas , incluso para productos
difíciles y problemáticas complejas.
4. Wypych PW. Design Considerations of Long-Distance Pneumatic Transport and
Pipe Branching. :712-772.
5. Geldart D. Types of Gas Fhization. 1973;7:285-292.
6. 9 Conveying.
7. Unibersitatea N, Goi I, Eskola M. Flujo de aire a través de tuberías y toberas.
8. W. Jenike. Storage and flow of solids, bulletin no. 123. Bulletin of the University
of Utah, 53(26):198, 1964.
9. Manso AP. Cálculo básico de una instalación de transporte neumático de sólidos.
:113-116.
10. VENTILADORES. :1-27.
11. I AAI, Aire TD De. Aire Acondicionado (I.I.).
12. G-17g.pdf.
13. Dyke V. Flussi piani supersonici con onde d ' urto. :64-101.
14. Sa ET. DEPURACION DE GASES en procesos industriales GAS ABSORPTION in
industrial process protección del medio ambiente environmental protection.
15. Omar M, Ortega C. F í s i c a I I. 2009.
16. Innova Ingeniería - Valvulas rotativas.
17. Especiales C. Programa. Componentes. >. 2013.
18. EXTRACTORES.
19. Sin S. Extractor vibrante “ solids “ para descarga de silos Tipo EVK El flujo
homogéneo de toda la masa del producto , evita la formación de soportación de
cargas elevadas . Ventajas : Extractor vibrante “ solids “ para descarga de silos Tipo
EVK Funcionamiento :
20. MECANICA DE FLUIDOS _ TEOREMA DE BERNOULLI.

21. Perry R., "Perry's chemical engineer's handbook", McGraw-Hill, 6th edition, 1997.
22. Rhodes M., "Introduction to particle technology", Jon Wiley & Sons, 2nd edition, 2008
23. Ratnayake C., "A comprehensive scaling up technique for pneumatic transport systems", The Norwegian University of Science and Technology, Department of Technology, 2005.
24. Herning, F. "Transporte de fluidos por tuberías"(1975).
25. Rase, H.F. "Diseño de tuberías para plantas de proceso" (1973).
26. Targhetta, L. y López, A. "Transporte y almacenamiento de materias primas en la industria básica" (1970).
27. Baquero, J. y Llorente, V. "Equipos para la industria química y alimentaria" (1985).
28. Perry, J.H. "Manual de ingeniero químico".
29. E.E.U.A., "Pneumatic handling of powdered materials"
30. Lide, D.R. "Handbook of chemistry and physics" (1993-94).
31. Willians O. A., "Pneumatic an hidraulic conveying of solids".